

การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์  
นาโนคอมพอสิต



นางสาวสินีนาง ไทยบุญรอด

ศูนย์วิทยพัทยาการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF THERMOPLASTIC  
POLYURETHANE/POLYPROPYLENE/MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES



Miss Sineenat Thaiboonrod

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/  
พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

โดย

นางสาวสินีนญา ไทยบุญรอด

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี แจ่มศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข)

สื่อนานา ไทยบุรุษอด : การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต. (PREPARATION AND PROPERTIES OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE/POLYPROPYLENE/MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร 114 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (ทีพียู) ถูกนำมาผสมแบบหลอมเหลวกับพอลิโพรพิลีน (พีพี) ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ถูกดัดแปรด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนแคทไอออนโดยใช้อะมีนปฐมภูมิทำให้มีระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเพิ่มขึ้นจาก 1.25 นาโนเมตร เป็น 1.70 นาโนเมตร มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรแล้วถูกนำมาใช้เป็นตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมทีพียู/พีพี นาโนคอมพอสิตนี้ถูกเตรียมขึ้นทั้งที่ใช้และไม่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม จากนั้นศึกษาผลของอัตราส่วนการผสม ปริมาณการใช้ตัวเติม และปริมาณของสารช่วยผสมต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต และสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต โดยปกติแล้วพอลิเมอร์ผสมทีพียู/พีพีไม่สามารถเข้ากันได้จึงมักมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งเป็นสารช่วยผสม ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในปริมาณ 1 ส่วนโดยน้ำหนักในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ร่วมกับพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 5 ส่วนโดยน้ำหนักในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติด้านแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตและการสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นไปในทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านแรงดึง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์.....  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ  
ปีการศึกษา...2551

ลายมือชื่อผู้นิสิต สื่อนานา ไทยบุรุษอด  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.ประณัฐ โพธิยะราช  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ร่วม อ.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร

##5072513923: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : TPU / PP / NANOCOMPOSITES

SINEENAT THAIBOONROD : PREPARATION AND PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC POLYURETHANE/POLYPROPYLENE/  
MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES. ADVISOR : ASSOC. PROF.  
PRANUT POTIYARAJ, PH.D., CO-ADVISOR : URAIWAN LEELA-ADISORN,  
PH.D., 114 pp.

Thermoplastic polyurethane/polypropylene/monthmorillonite nanocomposites were studied. Thermoplastic polyurethane (TPU) was melt blended with polypropylene (PP) at various ratios in a twin-screw extruder. Montmorillonite was modified via cation exchange process using a primary amine and was then used as a filler in TPU/PP blends. The interlayer spacing of organo-modified montmorillonite increased from 1.25 nm to 1.70 nm comparing with unmodified montmorillonite. The nanocomposites were prepared either without or with polypropylene grafted maleic anhydride (PP-g-MA) as a compatibilizer. Effects of the blending ratio, filler loading and amount of PP-g-MA on mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of the nanocomposites were then investigated. Generally, TPU/PP blends are incompatible blends resulting in poor mechanical properties. With the addition of PP-g-MA, overall properties of unfilled blends were improved. The results revealed that the addition of 1 phr of organo-modified montmorillonite into the TPU/PP blend, in the presence of PP-g-MA at 5 phr, significantly improved the tensile properties.

Department :Materials Science.....

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology

Academic Year : 2008.....

Student's Signature Sineenat Thaiboonrod

Advisor's Signature Pranut Potiyaraj

Co-Advisor's Signature Uraivan Leela-adisorn

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเชื่อเฟื่องทางด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่สำหรับทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและการแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาติศร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เขียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์อรุษา สรวารี และรองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย

5. บริษัท เอ็ม ซี โปลิเมอร์ จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อเมล็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนสำหรับใช้ในงานวิจัย และเงินสนับสนุนงานวิจัย

6. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อมอนิเตอร์มอริลไลน์สำหรับใช้ในงานวิจัย

7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2. วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	3
2.2 พอลิโพรพิลีน.....	7
2.3 พอลิเมอร์ผสม.....	9
2.4 วัสดุนาโนคอมพอสิต.....	23
2.5 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต.....	25
2.6 แร่มอนต์มอริลโลไนต์.....	25
2.7 กระบวนการผสม.....	28
2.8 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่แบบ.....	32
2.9 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	33
2.10 สมบัติเชิงกลของพลาสติก.....	36
2.10.1 สมบัติด้านแรงดึง.....	36
2.10.2 สมบัติเชิงกลพลวัต.....	38
2.11 สมบัติทางความร้อน.....	40
2.11.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	43
2.11.2 เทอร์มोगราวิเมตริกแอนนาไลซิส.....	44
2.12 สัณฐานวิทยา.....	45
2.12.1 กล้องจุลทรรศน์.....	45

2.12.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	46
2.13	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3.	การทดลอง.....	53
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	53
3.2	วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	54
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.4	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	56
3.5	ขอบเขตการทดลอง.....	57
3.6	การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร.....	58
3.7	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน.....	59
3.8	การเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต.....	60
3.9	การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	61
3.10	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค เอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	62
3.11	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	62
3.11.1	การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	62
3.11.2	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	62
3.12	การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	64
3.12.1	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	64
3.12.2	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาลิซิส.....	65
3.13	การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	66
4.	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	67
4.1	ผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม.....	67
4.1.1	ความทนแรงดึง การยืดตัว ๓ จุดขาด และยังมีอดุลัส.....	67
4.1.2	สัณฐานวิทยา.....	69
4.1.3	อุณหภูมิการสลายตัว.....	70
4.2	ผลของปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	71
4.2.1	ความทนแรงดึง การยืดตัว ๓ จุดขาด และยังมีอดุลัส.....	72
4.2.2	สมบัติเชิงกลพลวัต.....	74



4.2.3	สี่ฐานวิทยา.....	76
4.2.4	คุณหมุมิการสลายตัว.....	77
4.3	ผลของการตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์.....	78
4.4	ผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์.....	79
4.4.1	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	79
4.4.2	ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังมีอดุลัส.....	81
4.4.3	สมบัติเชิงกลพลวัต.....	85
4.4.4	สี่ฐานวิทยา.....	87
4.4.5	คุณหมุมิการสลายตัว.....	89
4.4.6	คุณหมุมิการหลอมเหลวและคุณหมุมิการกลาสทรานซิชัน.....	90
5.	สรุปผลการทดลอง.....	93
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	93
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	94
	รายการอ้างอิง.....	95
	ภาคผนวก.....	100
	ภาคผนวก ก.....	101
	ภาคผนวก ข.....	108
	ภาคผนวก ค.....	110
	ภาคผนวก ง.....	113
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบหลักของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	3
2.2	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง.....	11
2.3	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง.....	12
2.4	การเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน.....	32
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	53
3.2	สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Irogran A85G4819).....	54
3.3	สมบัติของพอลิโพรพิลีน (HP400K).....	55
3.4	สมบัติของพอลิโพรพิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond MZ203D).....	55
3.5	สมบัติของออกตะเดซิลเอมีน.....	56
3.6	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม.....	57
3.7	อัตราส่วนของนาโนคอมพอสิต.....	58
4.1	จุดสูงสุดของกราฟ $\tan \delta$ ของพอลิเมอร์ผสม.....	75
4.2	อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆโดยมีปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 0 3 5 และ 10 phr.....	77
4.3	จุดสูงสุดของกราฟ $\tan \delta$ ของนาโนคอมพอสิต.....	85
4.4	อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก.....	91
4.5	อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก.....	92

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทั่วไปของสายโซ่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	4
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-diphenylmethane diisocyanate (MDI).....	5
2.3	โครงสร้างทางเคมีของ 1,4-butanediol.....	5
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ 1,4-bis(2-hydroxyethoxy)benzene.....	5
2.5	โครงสร้างทางเคมีของ Poly (tetramethylene adipate) glycol.....	5
2.6	โครงสร้างทางเคมีของ Poly(1,2-oxypopylene) glycol.....	5
2.7	โครงสร้างบล็อกโคพอลิเมอร์ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	6
2.8	โครงสร้างแบบสเตอริโอของพอลิโพรพิลีน.....	9
2.9	การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน.....	11
2.10	แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น LCST.....	14
2.11	แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น UCST.....	15
2.12	กลไกของบล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด.....	16
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม.....	19
2.14	ลักษณะต่างๆของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม..	20
2.15	การกระจายตัวที่ไม่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์.....	22
2.16	การกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์.....	22
2.17	ชนิดของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต.....	23
2.18	โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	26
2.19	การยึดติดกันระหว่างชั้นของเคลย์กับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของเคลย์.....	26
2.20	เครื่องผสมแบบแบนนารี.....	29
2.21	เครื่องอัดรีด.....	30
2.22	ประเภทสกรูของเครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	31
2.23	เครื่องอัดแบบ.....	33
2.24	อธิบายสมการแบรกก์ที่ใช้ในเทคนิค XRD.....	34
2.25	หลักการการทำงานของเครื่อง XRD โดยสังเขป.....	35
2.26	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดทั่วไปในการทดสอบความทนแรงดึงของ พลาสติก.....	36
2.27	แผนภาพความเค้น-ความเครียด และเส้นสัมผัสเริ่มแรกที่ใช้หาค่ามอดุลัส.....	37

2.28	หลักการทํางานของเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	39
2.29	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม A และ B ที่อัตราส่วน 50:50.....	42
2.30	การวิเคราะห์โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	44
2.31	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส.....	45
2.32	กล้องจุลทรรศน์.....	46
2.33	หลักการทํางานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	47
3.1	เครื่องปั่นความเร็วสูง.....	58
3.2	ผงมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร.....	59
3.3	เครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	60
3.4	เครื่องอัดแบบ.....	61
3.5	แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	61
3.6	เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน.....	62
3.7	เครื่องทดสอบความทนแรงดึง.....	63
3.8	ขึ้นทดสอบความทนแรงดึง.....	63
3.9	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	64
3.10	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	64
3.11	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์.....	65
3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	66
4.1	ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ.....	67
4.2	การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ.....	68
4.3	ค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ.....	68
4.4	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม.....	70
4.5	TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ.....	71
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมกับพอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไคโดรด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	72
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมกับ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	72
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์ผสมกับพอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	73

4.9	กราฟ $\tan \delta$ ของ PP, TPU และพอลิเมอร์ผสม TPU/PP/PP-g-MA.....	75
4.10	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ TPU/PP เป็น 90/10.....	76
4.11	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ TPU/PP เป็น 80/20.....	76
4.12	แพทเทิร์นพีการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และ มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร.....	78
4.13	แพทเทิร์นพีการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของนาโนคอมพอลิทีระหว่าง TPU/PP/PP-g-MA/OMMT ที่อัตราส่วน TPU/PP เท่ากับ 90/10.....	80
4.14	แพทเทิร์นพีการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของนาโนคอมพอลิทีระหว่าง TPU/PP/PP-g-MA/OMMT ที่อัตราส่วน TPU/PP เท่ากับ 80/20.....	80
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอลิที ที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10.....	82
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอลิที ที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20.....	84
4.17	กราฟ $\tan \delta$ ของนาโนคอมพอลิทีระหว่าง TPU/PP/PP-g-MA/OMMT.....	86
4.18	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิทีที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10 ที่มีปริมาณ เคลย์ 1 phr.....	87
4.19	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิทีที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10 ที่มีปริมาณ เคลย์ 3 phr.....	88
4.20	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิทีที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20 ที่มีปริมาณ เคลย์ 1 phr.....	88
4.21	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิทีที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20 ที่มีปริมาณ เคลย์ 3 phr.....	88
4.22	TGA thermograms ของนาโนคอมพอลิทีที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10.....	89
4.23	TGA thermograms ของนาโนคอมพอลิทีที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20.....	90
4.24	DSC thermograms ของนาโนคอมพอลิทีที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 10.....	91
4.25	DSC thermograms ของนาโนคอมพอลิทีที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 20.....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายยางแต่ยังคงสมบัติเด่นของเทอร์โมพลาสติกคือสามารถหลอมขึ้นรูปได้ง่ายและหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU) เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น เพราะนอกจากจะมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แล้ว ยังสามารถควบคุมสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนให้มีความยืดหยุ่นหรือแข็งเกร็งเหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลายได้ด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ แต่เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนยังมีราคาสูง การนำไปใช้ทดแทนพลาสติกที่ใช้ในชีวิตประจำวัน จึงยังไม่ได้รับความนิยมมากเท่าที่ควรเนื่องจากปัจจัยด้านต้นทุน จึงมีแนวคิดในการค้นคว้าวิจัยโดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพลาสติกชนิดอื่นที่มีราคาไม่สูงนักเพื่อลดปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนลง พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งซึ่งถูกนำมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเพื่อลดต้นทุนของวัสดุ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือพอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันไม่ได้ จึงทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด อาจทำได้โดยการใช้สารช่วยผสม ซึ่งจะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีนนอกจากจะช่วยลดต้นทุนของวัสดุได้แล้ว หากปริมาณของพอลิโพรพิลีนมีมากกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติความทนแรงกระแทกดีกว่าพอลิโพรพิลีนโดยเฉพาะเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ต่ำและมีความเป็นผลึกสูง ดังนั้นการทำพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีนจึงสามารถช่วยปรับปรุงข้อจำกัดดังกล่าวของพอลิโพรพิลีนได้อีกด้วย

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมนอกจากจะใช้สารช่วยผสมแล้วยังสามารถทำได้โดยการเตรียมเป็นคอมพอสิตด้วยการใช้ตัวเติมเสริมแรง โดยในปัจจุบันมีความสนใจในการเตรียมวัสดุประเภทนาโนคอมพอสิตทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรม นาโนคอมพอสิตเป็นคอมพอสิตที่มี

สารเสริมแรงขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่มีสมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านของแก๊ส สมบัติการทนไฟ และเสถียรภาพทางความร้อนเหนือกว่าวัสดุคอมพอสิตดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เนื่องจากการใช้สารเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรทำให้มีพื้นที่ผิวมากสำหรับการเสริมแรง อีกทั้งยังทำให้ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสารเสริมแรงที่มีขนาดระดับไมครอนหรือใหญ่กว่า จึงทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงสูง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีนด้วยการผสมแบบหลอมเหลว โดยศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ นอกจากนี้ยังได้ทดลองเตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรกับพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนเพื่อศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่เตรียมขึ้นทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารช่วยผสม



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane)

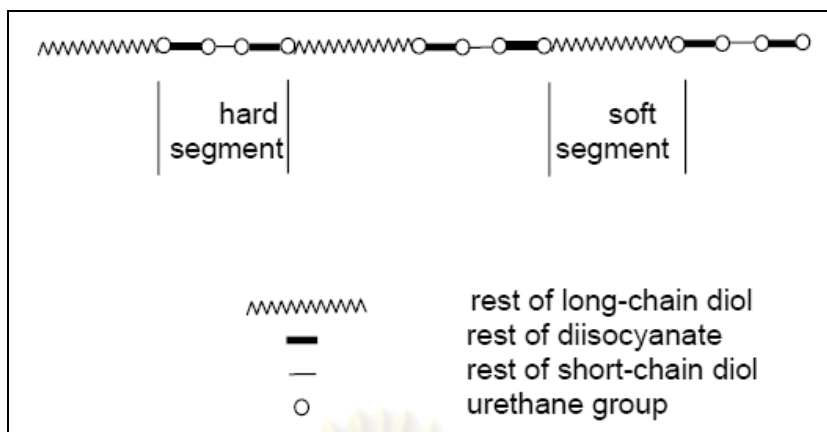
เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU) คือพอลิยูรีเทนซึ่งถูกดัดแปลงให้มีสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ กล่าวคือมีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยางแต่ยังคงความเป็นเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมได้หลายครั้ง เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจึงสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการสำหรับขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไปได้ ไม่ว่าจะเป็นการอัดรีด (extrusion) การเป่าเข้าแบบ (blow molding) การฉีดเข้าแบบ (injection molding) หรือการอัดแบบ (compression molding) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ทำ vacuum-formed หรือ solution-coated และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเหนือกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ คือ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถดัดแปรเพื่อให้มีสมบัติทางกายภาพตามต้องการได้ จึงมีการนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย [1]

องค์ประกอบพื้นฐานของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ได้แก่ ไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate) ไดออลสายโซ่ยาว (long-chain diol) และไดออลสายโซ่สั้น (short-chain diol) โดยไดไอโซไซยาเนตและไดออลสายโซ่สั้นจะทำให้เกิดส่วนแข็ง (hard segment) ในโครงสร้าง ขณะที่ไดออลสายโซ่ยาวจะทำให้เกิดส่วนอ่อนนิ่ม (soft segment) ในโครงสร้าง และเนื่องจากทั้ง 2 ส่วนนี้ไม่เข้ากันจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 เฟส

ตาราง 2.1 องค์ประกอบหลักของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [2]

องค์ประกอบ	โครงสร้างทั่วไป
ไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate)	OCN-R-NCO
ไดออลสายโซ่ยาว (long-chain diol/macroglycol)	HO-R'-OH
ไดออลสายโซ่สั้น (short-chain diol/chain extender)	HO---R"---OH





รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของสายโซ่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [3]

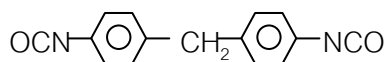
เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ชนิดพอลิเอสเตอร์และชนิดพอลิอีเทอร์ โดยทั่วไปแล้วเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเตอร์จะมีสมบัติทางกายภาพเสถียรภาพทางความร้อนและความต้านทานน้ำมันที่ดีกว่า แต่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์ที่ความแข็งใกล้เคียงกัน จะมีสมบัติที่อุณหภูมิต่ำและความต้านทานต่อแบคทีเรียที่ดีกว่า

การใช้งานของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีได้หลากหลาย เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีค่าความแข็งตั้งแต่ 70 shore A ถึง 80 shore D และมีทั้งในรูปเม็ด (pellet form) และแกรนูล (granular form) สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างหลากหลาย เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมรถยนต์ทั้งชิ้นส่วนรถยนต์ภายในและภายนอก ท่อ พิล์มเป่าแบบ (blown film) แผ่นรองรองเท้า เป็นต้น ซึ่งการจะเลือกใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเกรดใดนั้นขึ้นกับการนำไปใช้งานเป็นหลัก

### 2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

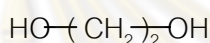
เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสายโซ่ตรงโดยทั่วไปจะสังเคราะห์จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับไดออลสายโซ่สั้น และไดออลชนิดพอลิเอสเตอร์หรือพอลิอีเทอร์

1) ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมากที่สุดคือ 4,4'-diphenylmethane diisocyanate (MDI) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.2

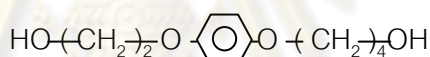


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-diphenylmethane diisocyanate (MDI)

2) ไดออลสายโซ่สั้น (Short-Chain Diol) หรือเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extender) จะทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตเกิดเป็นเฟสของผลึก (ส่วนแข็ง) ในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ซึ่งผลึกจะช่วยเสริมความแข็งแรงโดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางและช่วยเพิ่มความต้านทานความร้อนให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนด้วย ไดออลสายโซ่สั้นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ได้แก่ 1,4-butanediol และ 1,4-bis(2-hydroxyethoxy)benzene ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4

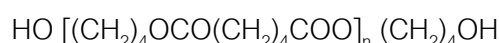


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ 1,4-butanediol

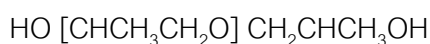


รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ 1,4-bis(2-hydroxyethoxy)benzene

3) ไดออลสายโซ่ยาว (Long-Chain Diol) หรือแมคโครไกลคอล (macroglycol) ที่ใช้สังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 600 ถึง 6000 และสามารถแบ่งได้เป็นชนิดพอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์ โดยไดออลสายโซ่ยาวจะทำให้เกิดส่วนของอสัณฐาน (ส่วนอ่อนนิ่ม) ในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ไดออลสายโซ่ยาวที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ได้แก่ Poly (tetramethylene adipate) glycol และ Poly(1,2-oxypropylene) glycol ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6



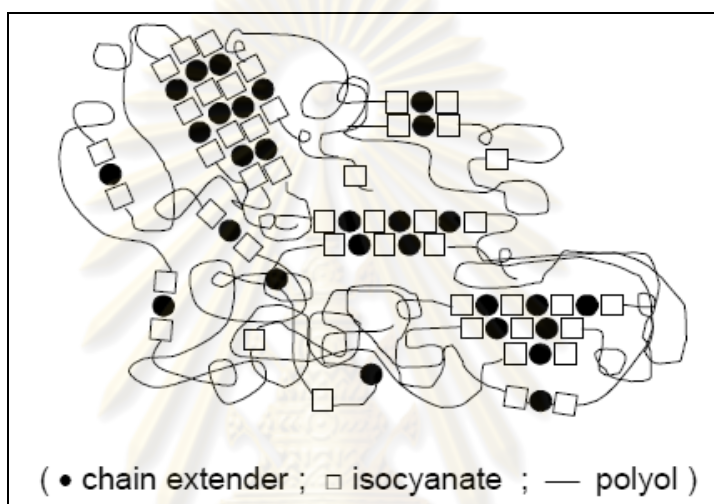
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Poly (tetramethylene adipate) glycol



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ Poly(1,2-oxypropylene) glycol

### 2.1.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymer) ที่ประกอบด้วยส่วนอสัณฐาน (ส่วนอ่อนนิ่ม) และส่วนผลึก (ส่วนแข็ง) ซึ่งเกิดจากความไม่เข้ากันของไดออลสายโซ่สั้นและไดออลสายโซ่ยาวกับไดไอโซไซยาเนต โดยส่วนแข็งจะกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนที่อ่อนนิ่มซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [3]

องค์ประกอบทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของไดออลสายโซ่ยาวจะส่งผลต่อปริมาณการแยกเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน โดยไดออลสายโซ่ยาวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้เกิดการแยกเฟสได้ดีกว่า และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเทอร์จะมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแกร่งกว่าจึงทำให้ 2 เฟสเข้ากันได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์

ส่วนแข็งในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะแสดงถึงความแข็ง (hardness), โมดูลัส (modulus) สมบัติด้านการฉีกขาด (tear strength) และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ขณะที่ส่วนอ่อนนิ่มในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะแสดงถึงความยืดหยุ่นและสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ

### 2.1.3 สมบัติทั่วไปของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [4]

- ด้านทานการฉีกขาดได้ดี
- ทนทานน้ำมันและไขมัน

- ทนทานต่อสารเคมี
- ด้านทานการขีดถูและด้านทานการขูดขีดได้ดี
- มีความยืดหยุ่นสูง
- สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- โปร่งใส
- มีสมบัติเชิงกลที่ดี

## 2.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

หลังจากที่พอลิเอทิลีนออกสู่ตลาดได้ราว 15 ปี ได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์พลาสติกชนิดใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างจากพอลิเอทิลีน คือ พอลิโพรพิลีนซึ่งผลิตจากแก๊สพอลิโพรพิลีนได้สำเร็จ โดย Natta จากประเทศอิตาลีได้ศึกษาการทำงานของ Ziegler และในปีค.ศ.1954 Natta ได้ประสบความสำเร็จในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta catalyst) ซึ่งได้เริ่มผลิตในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1957 เป็นต้นมา

พอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 200,000 มีความเป็นผลึกสูง มีความหนาแน่น 0.905 กรัม/ลบ.ซม. และเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงจึงทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเชิงกลดีมาก เช่น เหนียว แข็งแกร่ง และมีความทนแรงดึงสูง พอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีน จึงทนความร้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้ความเป็นผลึกยังช่วยสกัดกั้นการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ไอ้ น้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ สามารถทนกรดและเบสได้ดี ขึ้นรูปง่าย และมีราคาถูก แต่พอลิโพรพิลีนยังมีข้อจำกัดในการใช้งานบางอย่าง เช่น เปราะและแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำ เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ชอบน้ำ ติดสียาก และมีเสถียรภาพต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมที่เกิดพันธะกับคาร์บอนของศา 3 (tertiary carbon atom) ดังนั้นก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนต์และอัลตราไวโอเล็ตสเทบิไลเซอร์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของชิ้นงานที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีน [5]

### 2.2.1 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน [6]

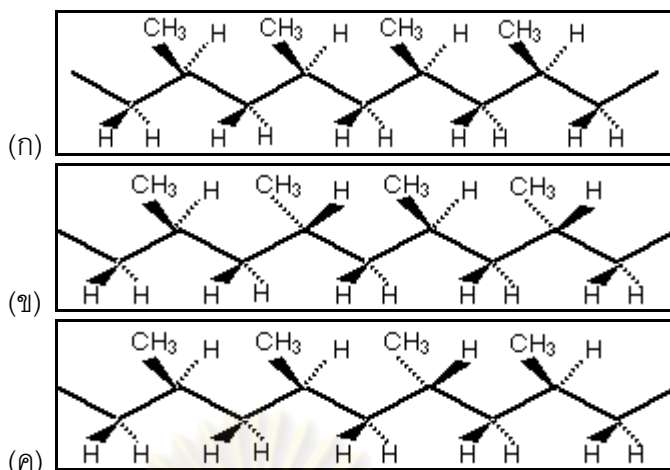
พอลิโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลโพรพิลีนในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งโครงสร้างที่ไม่สมมาตรของพอลิโพรพิลีนนำไปสู่การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลภายในสายโซ่ได้ 3 แบบ คือ

1. แบบหัวต่อหาง (head to tail)
2. แบบหัวต่อหัว (head to head)
3. แบบหางต่อหาง (tail to tail)

จากผลด้านสเตอริก (steric effect) ของหมู่เมทิลทำให้เกิดการจัดเรียงแบบหัวต่อหางเป็นส่วนใหญ่ ได้เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนที่มีความเป็นระเบียบทางเคมีสูง ซึ่งถ้าในโครงสร้างมีการจัดเรียงแบบหัวต่อหัวและแบบหางต่อหางจะทำให้เกิดข้อบกพร่องทางโครงสร้างเคมีบนสายโซ่พอลิโพรพิลีน และจากการที่หมู่เมทิลมีตำแหน่งอยู่บนคาร์บอนอสมมาตรจึงเกิดโครงสร้างแบบสเตอริโอ (stereo configurations) ได้ 3 แบบ คือ

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene, iPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันของระนาบตลอดสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก)
2. ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene, sPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่สลับกันคนละด้านของระนาบสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข)
3. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene, aPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่แบบสุ่มบนแต่ละด้านของระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ค) ซึ่งอะแทกติกพอลิโพรพิลีนสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบแรดิคัลระบบเก่าทำให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้

การใช้ตัวเร่งซีเกลอร์แนตตาที่มีความจำเพาะทำให้สามารถเลือกสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกหรือซินดีโอแทกติกได้ ซึ่งพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้าง 2 แบบนี้สามารถเกิดผลึกได้โดยการจัดเรียงส่วนของสายโซ่โมเลกุลขนานกับสายโซ่ข้างเคียงอย่างต่อเนื่องกันไป



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแบบสเตอริโอของพอลิโพรพิลีน [7]

(ก) ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน และ (ค) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน

### 2.2.2 สมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีน

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอด ปราศจากสาขาโซ่ ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกสูง ต่างจากอะแทกติกพอลิโพรพิลีนที่ละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด ซึ่งการละลายของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะเกิดขึ้นได้เฉพาะที่อุณหภูมิสูง (130-170 °C) ในตัวทำละลายฮาโลจีเนตเตตระไฮโดรแมติก ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนทนต่อการกัดและเบสเป็นอย่างดีและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตามเสถียรภาพของพอลิเมอร์นี้ต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์มีน้อยกว่าพอลิเอทิลีนเพราะมีไฮโดรเจนอะตอมที่ติดอยู่กับคาร์บอนองศา 3 (tertiary carbon) ดังนั้นก่อนนำไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์และอัลตราไวโอเล็ตสแตบิไลเซอร์ [6]

### 2.3 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends)

พอลิเมอร์ผสมคือ การนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อช่วยในการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งในปัจจุบันการผลิตพอลิเมอร์ผสมกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจาก

พอลิเมอร์ผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา เช่น การทำให้พอลิสไตรีนมีความเหนียว ไม่เปราะแตกง่าย โดยทำการผสมพอลิสไตรีนกับยาง หรือที่รู้จักกันในชื่อว่า 'HIPS' (high impact polystyrene) แต่การที่จะนำพอลิเมอร์มาผสมกัน เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้นจำเป็นต้องพิจารณาจากองค์ประกอบต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย เช่น โครงสร้าง สมบัติ และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด หากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันไม่สามารถเข้ากันได้ดีจะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ด้อยลง

ระบบพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วย 2 เฟส คือ เมทริกซ์เฟส และดิสเพอร์สเฟส ซึ่งเมทริกซ์เฟส คือ เฟสที่เป็นตัวหลักที่กำหนดสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ส่วนดิสเพอร์สเฟส คือ เฟสที่มีการกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดยอาจจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเส้นใย ทรงกลม แผ่น หรือโครงสร้างที่เป็นแผ่นบาง (lamellae) เป็นต้น เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก จะมีพอลิสไตรีนเป็นเมทริกซ์เฟส และพอลิบิวตะไดอินเป็นดิสเพอร์สเฟสกระจายตัวอยู่ในพอลิสไตรีน ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเปราะลดลงเพราะอนุภาคของพอลิบิวตะไดอินจะไปช่วยในการรับแรงกระแทก และมีความอ่อนนุ่มมากกว่าพอลิสไตรีนธรรมดา แต่จะมีลักษณะขุ่นเพราะอนุภาคของพอลิบิวตะไดอินนั้นไปทำให้เกิดการกระเจิงของแสง [8]

โดยการผสมพอลิเมอร์ผสมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

#### 1) การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Reactive blending)

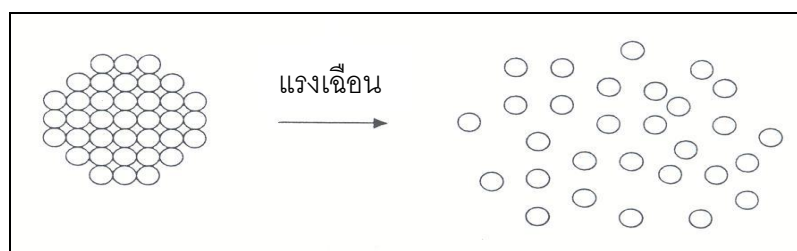
พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้นจะต้องมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ทำให้เกิดพันธะทางเคมีขึ้น เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตและพอลิเอไมด์ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง

ชนิด	วิธีการเตรียม
Interpenetrating Polymer Networks (IPN)	ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางแล้วบวมตัวในมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ หลังจากนั้นทำให้มอนอเมอร์เกิดพอลิเมอร์โซ่สั้นและเชื่อมขวางกัน ทำให้เกิดการไขว้กันของพอลิเมอร์ 2 ชนิด
Semi-Interpenetrating Polymer Networks (SIPN)	ผสมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่เข้าด้วยกันกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์แล้วจึงพอลิเมอร์โซ่สั้นให้กลายเป็นพอลิเมอร์ร่างแหไขว้กับพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติก
Simultaneous Interpenetrating Polymer (SIN)	ผสมมอนอเมอร์ต่างๆ เข้าด้วยกันโดยจะเกิดไฮโมพอลิเมอร์โซ่สั้นและโครงสร้างแบบเชื่อมขวางในเวลาเดียวกัน แต่ไม่เกิดกลไกที่มีแรงกระทำระหว่างกัน
Interpenetrating Elastomeric Networks (IEN)	ทำการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในรูปของลาเทกซ์ โดยจะทำหลังจากเกิดภาวะที่ของเหลวกลายเป็นก้อนแล้ว

## 2) การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Non-reactive blending)

การผสมวิธีนี้ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องคำนึงถึงหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยแสดงวิธีการผสมพอลิเมอร์ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการผสม เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) จะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสม แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะไปทำให้พอลิเมอร์เกิดการกระจายตัวกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้การผสมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อาจเรียกว่าเป็นการผสมเชิงกลก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน



ตารางที่ 2.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง

ชนิด	วิธีการเตรียม
Mechanochemical Blends	ผสมพอลิเมอร์ด้วยอัตราแรงเฉือนสูง เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว โดยฟรีแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะรวมตัวเป็นของผสมเชิงซ้อน ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มและพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง
Solution-Cast Blends	ละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายแล้วเทลงแม่แบบ หลังจากนั้นจึงระเหยไล่ตัวทำละลายออกไป
Latex Blends	ผสมพอลิเมอร์กับน้ำเข้าด้วยกันจนกระทั่งพอลิเมอร์กระจายตัวได้ดีในน้ำ ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีลักษณะเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นก้อน (coagulated)

โดยสิ่งที่จะต้องคำนึงมากที่สุดในการทำพอลิเมอร์ผสม คือ ความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยเฉพาะการผลิตในทางการค้า ซึ่งมีพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความสามารถในความเข้ากันได้ แต่บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลต่างกัน ความมีขั้วต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์ที่ทำการผสมกันไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างอิสระในพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้เกิดการแยกชั้นของพอลิเมอร์ขึ้น นอกจากนี้พลังงานของพอลิเมอร์แต่ละชนิดยังเป็นปัจจัยที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้หรือไม่ด้วย เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด [9]

### 2.3.1 กลไกในการผสมเข้ากันได้ (Compatibilization Mechanisms)

การผสมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะให้สมบัติไม่ค่อยดีโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและแรงเค้นสะสม (stress concentration) จากดิสเฟอर्सเฟสในเมทริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จะนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการ

ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม อาทิเช่น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมหรืออัลลอยด์จะขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของแต่ละองค์ประกอบ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างผิวสัมผัส (phase morphology) และแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) จะมีความสำคัญมากในการช่วยถ่ายโอนแรงในระหว่างการใช้งาน สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับภาวะที่ได้รับในระหว่างกระบวนการผสม เช่น ชนิดของเครื่องผสม อัตราการผสม อุณหภูมิในการผสม นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบในการผสม และแรงตึงผิวของแต่ละองค์ประกอบในขณะหลอมเหลว (interfacial tension)

### 2.3.2 วิธีในการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้จะขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้ ได้แก่

1. ความสามารถในการเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Miscibility)
2. การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง (Addition of Block or Graft Copolymer)
3. การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ (Addition of Function/Reactive Polymer)
4. การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างการผสม (In-Situ Grafting/Polymerization)

#### 1) ความเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Miscibility)

ความเข้ากันได้จะขึ้นกับสมดุลระหว่างเอนทัลปี (enthalpy) และเอนโทรปี (entropy) ของการผสมที่มีต่อพลังงานอิสระของการผสม (free energy of mixing) โดยที่เอนโทรปี คือ การวัดระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) หรือ ความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเมื่อมีการผสมเกิดขึ้น โดยการผสมจะทำให้เอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S$ ) จึง

มีค่าเป็นบวกเสมอ ( $S_2 > S_1$ ) สำหรับโมเลกุลใหญ่ๆ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจะมีค่าเข้าใกล้กับศูนย์ ดังนั้น การเข้ากันได้จึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

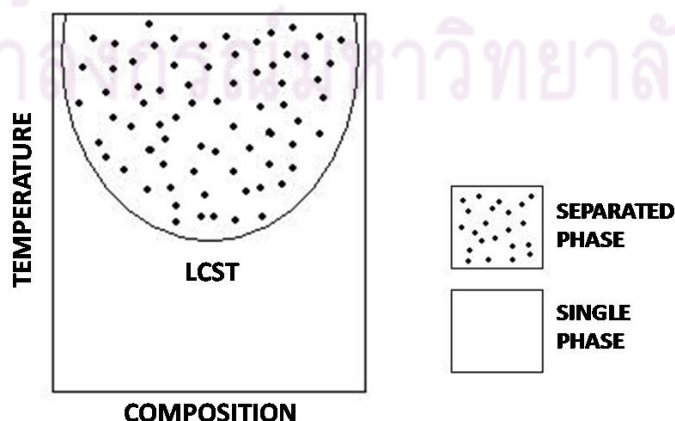
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

โดยที่  $\Delta G$  = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม  
 $\Delta H$  = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม  
 $\Delta S$  = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม  
 $T$  = อุณหภูมิ

โดยการผสมที่สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้ นั้น  $\Delta G$  ต้องมีค่าเป็นลบ ( $\Delta G < 0$ ) หรือ  $\Delta H - T\Delta S$  ต้องน้อยกว่าศูนย์ ( $\Delta H - T\Delta S < 0$ ) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี

ก. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Mixture)

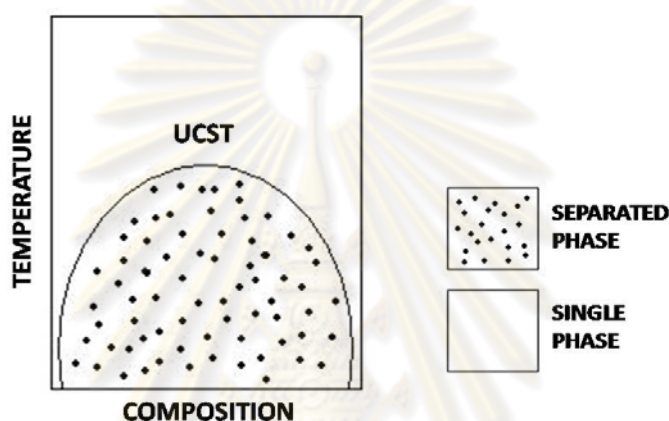
ภายในระบบของผสมจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน เช่น โมเลกุล A และโมเลกุล B ดึงดูดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นลบ ( $\Delta H < 0$ ) นั่นคือ การผสมสามารถเข้ากันได้ และเมื่อสร้างเป็นแผนภาพเฟส จะปรากฏดังรูปที่ 2.10 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบมากขึ้น จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง และอุณหภูมิต่ำสุดที่ของผสมเกิดการแยกเฟส เรียกว่า Lower Critical Solution Temperature (LCST)



รูปที่ 2.10 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น LCST [8]

ข. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Mixture)

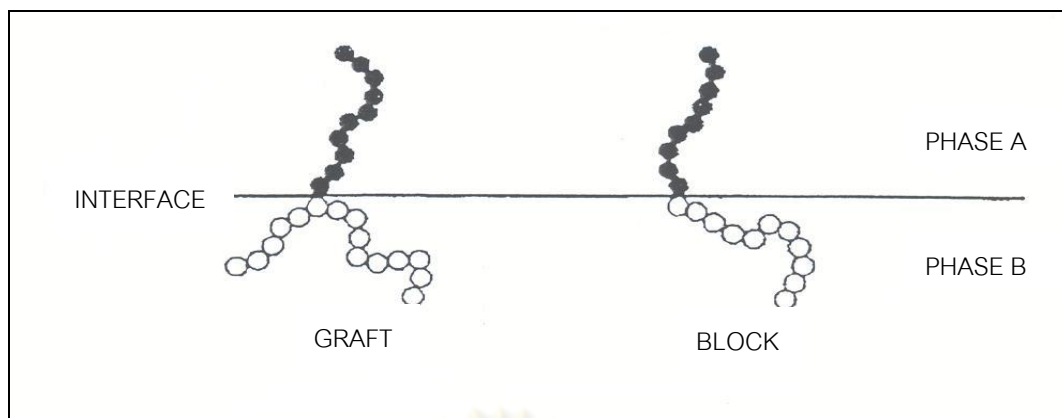
ถ้าภายในระบบของผสมไม่มีแรงดึงดูดระหว่างกัน จะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นบวก ( $\Delta H > 0$ ) ดังนั้นการผสมจะสามารถเข้ากันได้ดี เมื่อ  $T\Delta S$  มีค่ามากกว่า  $\Delta H$  ( $T\Delta S > \Delta H$ ) เพื่อให้  $\Delta G$  มีค่าเป็นลบ ( $\Delta G < 0$ ) การผสมที่เข้ากันได้ดีนั้นจะสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง หรือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ ดังปรากฏในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์ผสมจะเกิดการแยกเฟส ที่เรียกว่า Upper Critical Solution Temperature (UCST)



รูปที่ 2.11 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น UCST [8]

2) การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง (Addition of Block or Graft Copolymer)

การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มเป็นที่นิยมมากกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์แต่ละชนิดนำมาผสมกัน ส่วนโคพอลิเมอร์จะต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยพบว่าสายโซ่โมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะต้องยาวพอที่จะจับกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสม แต่ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงจนเกินไป เพราะจะแพร่ไปที่ผิวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ กลไกของสารช่วยผสมระหว่างเฟสดังแสดงไว้ในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 กลไกของพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มและพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่งที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด

โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสมอย่างมาก จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสมโดยการทดสอบด้านแรงดึง พบว่า

1. พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง
2. ไตพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม
3. ไตพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มที่ประกอบด้วยบล็อกสั้นสลับยาวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มที่มีความยาวของบล็อกเท่ากัน

หลักในการเลือกใช้โคพอลิเมอร์มาทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ได้แก่

1. สารช่วยผสมต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสม โดยแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มต้องมีความยาวเพียงพอที่จะแทรกไปอยู่ในแต่ละเฟสของโฮโมพอลิเมอร์ และต้องสั้นเพียงพอเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน
2. น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมจะต้องสัมพันธ์กับพอลิเมอร์ที่จะผสม โดยโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะใช้เวลาในการผสมนานกว่าเพื่อให้โคพอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟส ซึ่งจะตรงกันข้ามกับสารช่วยผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจะต้องเลือกสภาวะในการผสมให้สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสม
3. พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกับโฮโมพอลิเมอร์จะมีราคาแพง เนื่องจากหาได้ยากในทางการค้าและใช้ได้เฉพาะบางระบบ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการผลิตโคพอลิเมอร์ที่มีหลายองค์ประกอบอยู่ร่วมกัน (multicomponent copolymer) เช่น สไตรีน-

เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรีนไตรโพลีเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (SEBS) โดยใช้ในการผสมระหว่าง HDPE กับ PET เป็นต้น

โดยในระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้ บ่อยครั้งจะขึ้นกับความสามารถของสารช่วยผสม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารช่วยผสมจะมีหน้าที่ดังนี้ คือ

- ลดแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสในสภาวะหลอมเหลว ทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์
- ช่วยเพิ่มแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงระหว่างเฟส
- เพิ่มเสถียรภาพทางขนาดของดิสเพอร์สเฟส ภายใต้สภาวะการอบบ่ม (annealing)

3) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Addition of Function or Reactive Polymer)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ได้จากการนำพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาทำการดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ เช่น พันธะไอออนิก ซึ่งการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือผ่านเครื่องอัดรีด เช่น การกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิโอฟีนส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทำให้พอลิโอฟีนส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมสูงและมีราคาไม่แพง

4) การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างการผลิต (In-situ Grafting Copolymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างการผลิต หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากัน โดยแตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำ

การผสมจะถูกดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม เช่น การผสมพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจเกิดได้ ดังต่อไปนี้

1. เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะกระตุ้นโดยการเติมสารริเริ่มในระหว่างการผสม

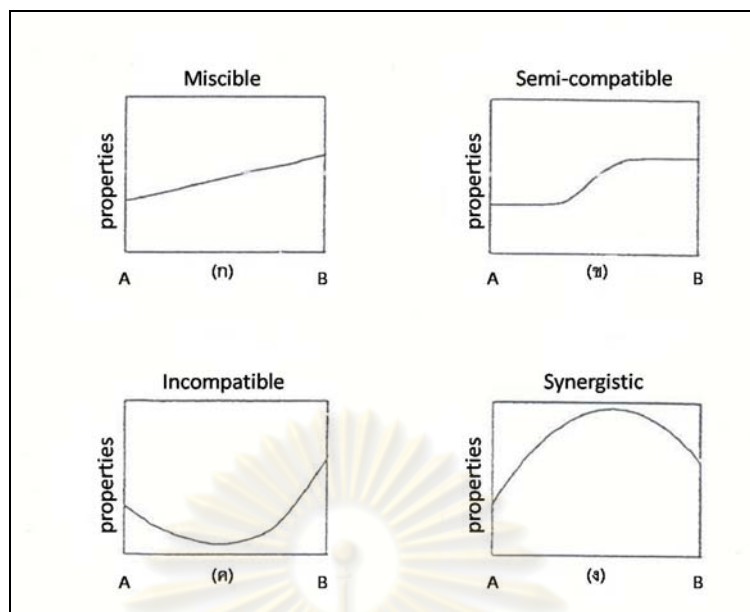
2. เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน (Interchange Reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดกับพอลิเมอร์แบบควบแน่น

3. เกิดการขาดหรือรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อที่จะสร้างพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้สภาวะที่มีความเค้นเฉือนสูง

4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

### 2.3.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับอัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบ รวมทั้งสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ ลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละองค์ประกอบ เช่น ลักษณะคล้ายแก้ว ยาง หรือเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผสม และการจัดเรียงโมเลกุล โดยการผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์จะแสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์เพียงเฟสเดียว ซึ่งเป็นการวางที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม

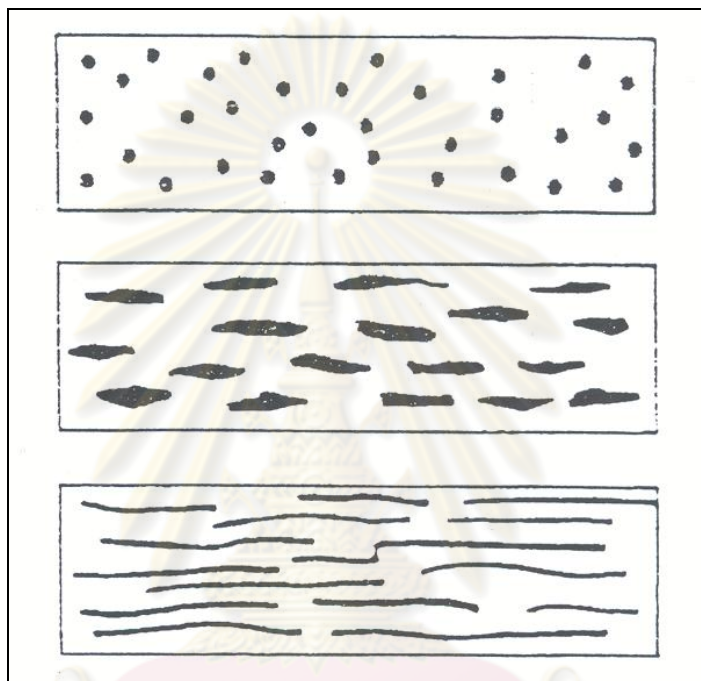
จากรูปที่ 2.13 ในระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนผสมกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) แต่ในการผสมส่วนใหญ่จะไม่ต้องการความเข้ากันได้สมบูรณ์ ต้องการความเข้ากันได้บางส่วน (semicompatible) คือ อนุภาคของดีสเพอร์สเฟสที่มีขนาดเล็กจะกระจายอยู่ในเมทริกซ์ โดยในระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และเมื่อนำไปพล็อตกราฟระหว่างสมบัติและอัตราส่วนการผสมจะได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายตัวเอส ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) โดยพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลัก และควบคุมสมบัติของชิ้นงาน ส่วนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกราฟมีสาเหตุมาจากการกลับเฟสของของผสม

ในระบบที่มีความเข้ากันน้อยมาก หรือไม่เข้ากันจะมีการแยกเฟสเกิดขึ้น โดยดีสเพอร์สเฟสจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายตัวอยู่ในเฟสหลัก และระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ หรือไม่มีเลย จากลักษณะดังกล่าว สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ไม่นิยมนำไปใช้งาน และจะได้กราฟระหว่างอัตราส่วนการผสมและสมบัติคล้ายรูปตัวยู ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ค) ส่วนระบบสุดท้ายจะพบได้น้อย โดยการผสมจะปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่าระบบอื่น คือ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมากกว่าหรือเท่ากับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ง)



### 2.3.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

การจัดเรียงตัวหรือสัณฐานวิทยาของแต่ละเฟสในพอลิเมอร์จะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สัณฐานวิทยาอาจจะมีลักษณะของดิสเพอร์สเฟสกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แผ่น หรือเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะต่างๆ ของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการผสม จะขึ้นกับอัตราส่วนของการผสม อัตราส่วนความหนืดในแต่ละองค์ประกอบ แรงตึงผิว และสภาวะของการผสม โดยองค์ประกอบที่มีเป็นจำนวนมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเมทริกซ์หรือเฟสหลัก โดยขนาดของดิสเพอร์สเฟสจะถูกควบคุมด้วยการแตกตัวเป็นหยดของดิสเพอร์สเฟส (drop breakout) และการรวมกลุ่ม (coalescence) ของดิสเพอร์สเฟส โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องผสม แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส และลักษณะการไหลของแต่ละองค์ประกอบ นอกจากนี้ รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสอาจจะถูกเปลี่ยนแปลงจากทรงกลมเป็นเส้นใยซึ่งเกิดจากการไหลแบบยืดดึงที่หัวตาย หรือจากทรงกลมเป็นแผ่นซึ่งเกิดจากการยืดดึงแบบ 2 ทิศทางในกระบวนการเป่า เป็นต้น

### 2.3.5 การกลับเฟส (Phase Inversion)

ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้าด้วยกันนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วพอลิเมอร์ดังกล่าวจะไม่เข้ากัน โดยจะแยกเป็น 2 เฟสตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสัจธรรมวิทย์ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสม สมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบ และสภาวะในการผสม กล่าวคือ เมื่อทำการผสมดิสเพอร์สเฟสในอัตราส่วนน้อย ดิสเพอร์สเฟสจะกระจายอยู่ในเฟสหลัก โดยอาจมีรูปร่างเป็นทรงกลม เส้นใย หรือแผ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการขึ้นรูป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนในการผสมให้มากขึ้น ดิสเพอร์สเฟสจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันเองของดิสเพอร์สเฟส และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมต่อไป ดิสเพอร์สเฟสจะเกิดการกลับเฟส (phase inversion) เปลี่ยนเป็นเฟสหลัก โดยก่อนถึงจุดนี้สัจธรรมวิทย์ของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลักทั้ง 2 เฟส เรียกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวว่า co-continuous ตัวอย่างของการกลับเฟสนี้สามารถเห็นได้จากการสังเคราะห์ high impact polystyrene (HIPS) ซึ่งการกลับเฟสจะเกิดขึ้นโดยในช่วงแรกเฟสของยางจะเป็นเฟสหลัก แต่เมื่อสิ้นสุดการสังเคราะห์แล้วพอลิสไตรีนจะเป็นเฟสหลัก

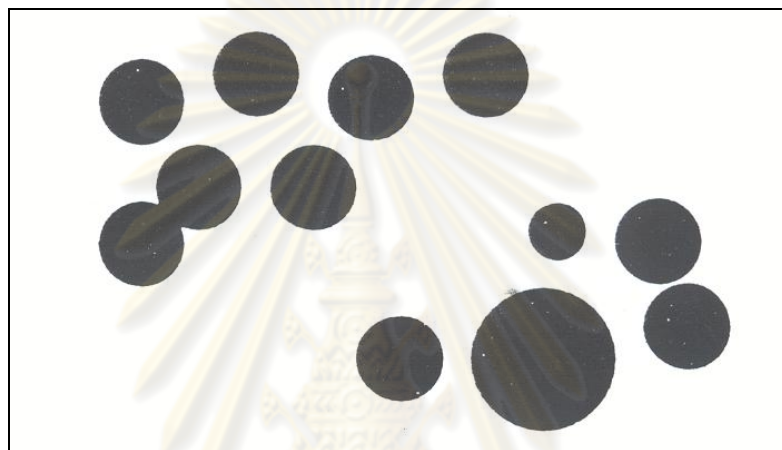
### 2.3.6 ความสามารถในการกระจายตัว

ความสามารถในการกระจายตัวของฟิลเลอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของฟิลเลอร์ ลักษณะของพื้นผิว ขนาดของอนุภาค และกระบวนการผลิต

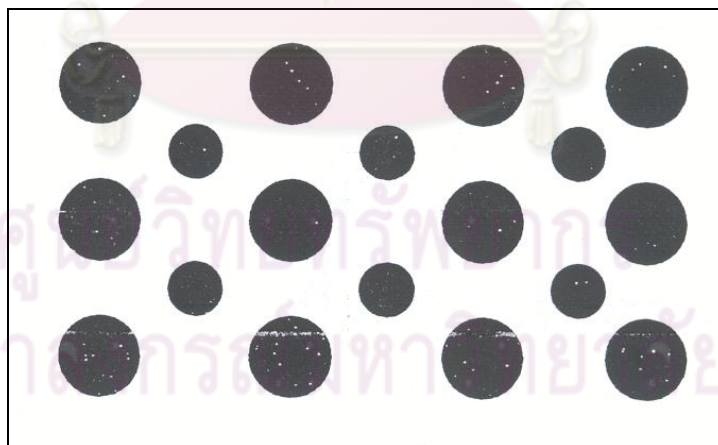
ลักษณะทางเคมีของฟิลเลอร์ คือ ความแข็งแรงของพันธะและลักษณะพิเศษของพื้นผิวซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะของฟิลเลอร์ สมบัติทางกายภาพและเคมีของผิวฟิลเลอร์จะเป็นตัวกำหนดแนวโน้มในการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือความแข็งแรงของการรวมกลุ่มกัน

ขนาดของอนุภาคมีความสำคัญต่อความยากง่ายในการกระจาย โดยทั่วไปแรงที่พื้นผิวของฟิลเลอร์ที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะมีแรงผลักดันให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยและค่อนข้างอ่อน แต่สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่า 1 ไมครอน จะยิ่งเข้าใกล้สถานะคอลลอยด์และมีแนวโน้มในการเกาะกลุ่มกันอย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิวหรือสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการป้องกันการเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอีกครั้งหนึ่ง เมื่อเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนจะถูกทำลายโดยกระบวนการกระจายตัว

กระบวนการที่มีการเติมฟิลเลอร์จะมีผลต่อการกระจายตัวในผลิตภัณฑ์ โดยเทคนิคที่นิยมใช้คือ การเคลือบผิวเพื่อเปลี่ยนลักษณะทางเคมีที่ผิวและลดแรงดึงดูดที่เกิดระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และพันธะเคมีของอนุภาค และเป็นวิธีที่ทำให้เกิดการล้อมรอบของอนุภาคหรือลดแรงที่จะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยการกระจายตัวที่เหมาะสมของฟิลเลอร์มีผลต่อสมบัติโดยรวมของผลิตภัณฑ์ โดยรูปที่ 2.15 แสดงการกระจายตัวที่ไม่ดีและรูปที่ 2.16 แสดงการกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวที่ไม่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์



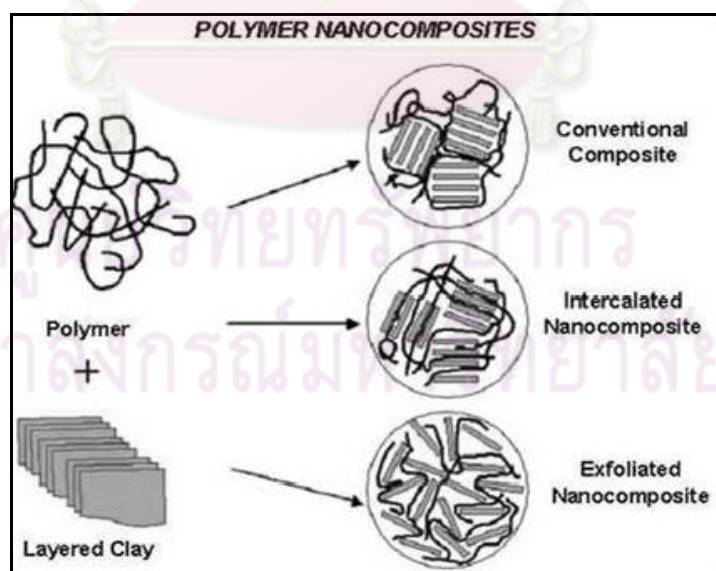
รูปที่ 2.16 การกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์

## 2.4 วัสดุนาโนคอมพอสิต

วัสดุนาโนคอมพอสิต คือวัสดุที่เตรียมขึ้นได้จากการนำสารตั้งแต่ 2 ชนิดมาผสมกัน โดยมีสารอย่างน้อย 1 ชนิดที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร ( $10^{-9}$  เมตร) โดยสารที่นำมาผสมกันนี้อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ที่เป็นอสัณฐาน ผลึกหรือกึ่งผลึก ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แต่เมื่อนำมาผสมกันแล้ว วัสดุที่ได้จะมีสมบัติด้านความแข็งแรง และสมบัติทนความร้อนที่ดีขึ้น [10]

ที่ผ่านมาวัสดุหลายชนิดถูกนำมาใช้ในการเสริมแรงวัสดุ วัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ เส้นใย นอกจากนี้เกล็ดและอนุภาคก็ถูกนำมาเสริมแรงในเนื้อพอลิเมอร์ด้วยเช่นกัน สำหรับการนำวัสดุที่มีขนาดนาโนเมตรมาใช้เสริมแรงวัสดุ จะเรียกวัสดุเสริมแรงนั้นว่า วัสดุนาโนคอมพอสิต ปัจจุบันได้มีการพัฒนานำวัสดุนาโนคอมพอสิตมาใช้ทางการค้าเพิ่มขึ้น ทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์ อาหาร เครื่องสำอาง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ขวดและภาชนะเป่าแม่แบบ [11]

วัสดุที่ถูกนำมาใช้เสริมแรงในวัสดุนาโนคอมพอสิตที่กำลังได้รับความสนใจอีกชนิดหนึ่งคือ เกล็ด เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งคอมพอสิตของเกล็ดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเกล็ดในเนื้อพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ชนิดของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต [12]

#### 2.4.1 คอมพอลิิตทั่วไป (conventional composite)

คอมพอลิิตทั่วไปจะประกอบด้วยอนุภาคเคลย์ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ โดยที่ชั้นแต่ละชั้นในโครงสร้างยังรวมกลุ่มกันอยู่ไม่แยกออกจากกัน สายโซ่พอลิเมอร์จะไม่แทรกสอดเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกต เฟสของพอลิเมอร์และเฟสของชั้นซิลิเกตจะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน

#### 2.4.2 นาโนคอมพอลิิตแบบแทรกสอด (intercalated clay nanocomposite)

คอมพอลิิตชนิดนี้ประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแทรกสอดเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกตตั้งแต่ 1 สายโซ่ขึ้นไปทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์ขยายออก แต่ชั้นของเคลย์จะยังไม่แยกจากกันอย่างชัดเจน ชั้นของเคลย์ยังคงรักษาความเป็นระเบียบได้ดี แต่เมื่อนำมาตรวจสอบโดยใช้การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray scattering) จะพบว่าระยะห่างระหว่างชั้นดินจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วนาโนคอมพอลิิตชนิดนี้จะมีค่าระยะห่างของชั้นซิลิเกตน้อยกว่า 20-30 อังสตรอม

นาโนคอมพอลิิตแบบแทรกสอดสามารถสังเคราะห์ได้โดยการแทรกสอดพอลิเมอร์โดยตรง (direct polymer intercalation) และการแทรกสอดขณะพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ in situ (in situ polymerization) ของมอนอเมอร์ในช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์ และเนื่องจากการมีที่ว่างที่จำกัดของพอลิเมอร์ระหว่างช่องว่างของชั้นที่หนาแน่นของเคลย์ ส่งผลให้นาโนคอมพอลิิตแบบแทรกสอดมีสมบัติการเหนียวและการสกัดกั้นที่ดี

#### 2.4.3 นาโนคอมพอลิิตแบบแยกจากกัน (exfoliated clay nanocomposite)

นาโนคอมพอลิิตแบบแยกจากกันมักจะมีปริมาณเคลย์ต่ำ และโครงสร้างเป็นแบบ monolithic (monolithic structure) เกิดการแยกออกจากกันของแต่ละชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ซึ่งการแยกของแต่ละชั้นในโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของพอลิเมอร์ในนาโนคอมพอลิิต

โครงสร้างที่เป็นแบบแยกจากกัน จัดว่าเป็นโครงสร้างที่เป็นแบบอุดมคติ เพราะชั้นของเคลย์จะมีการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกสอดเข้าไประหว่างชั้น

ของดินได้ และเมื่อได้ทำการศึกษาด้วยการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray scattering) จะพบว่า นาโนคอมพอสิตแบบนี้จะมีค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตมากกว่า 80-100 อังสตรอม แต่อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะทำให้เคลย์เกิดการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ในเนื้อพอลิเมอร์ เนื่องจากแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ที่แข็งแรงระหว่างชั้นซิลิเกตและประจุบวระหว่างแกลลอรี่

## 2.5 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

การเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตในปัจจุบันมี 3 วิธี การเลือกกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจะขึ้นกับความเหมาะสมและชนิดของพอลิเมอร์ [10]

### 2.5.1 solution intercalation

วิธีนี้ทั้งออร์กาโนเคลย์และพอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลาย สายโซ่พอลิเมอร์จะแทรกเข้าไประหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ และหลังจากระเหยตัวทำละลายก็จะได้นาโนคอมพอสิตแบบแทรกสอด

### 2.5.2 in-situ polymerization

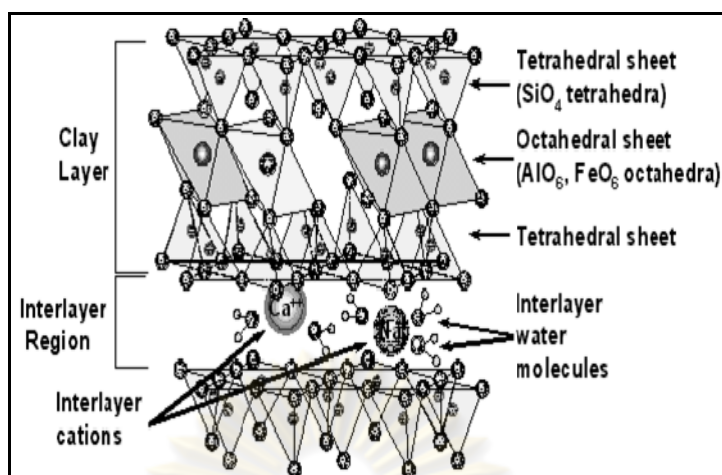
วิธีนี้เป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีของ solution intercalation แต่จะต่างกันตรงที่เปลี่ยนจากตัวทำละลายเป็นมอนอเมอร์ มอนอเมอร์จะแทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างแร่ดิน แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ วิธีนี้จะทำให้ได้นาโนคอมพอสิตแบบแยกจากกัน

### 2.5.3 melt intercalation

กระบวนการนี้เริ่มจากการผสมเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวแทรกเข้าไประหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์ กระบวนการนี้จะต้องมีความเร็วอย่างเพียงพอในขณะที่ผสมอยู่ในเครื่องเอ็กซ์ทราuder

## 2.6 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

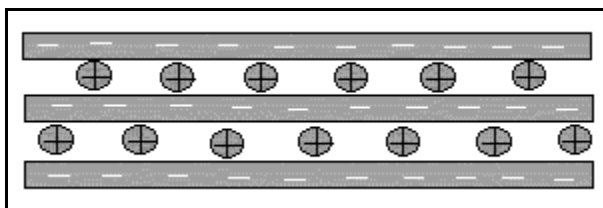
มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน ซึ่งชั้นที่อยู่ตรงกลางเป็นชั้นของอะลูมินา ที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกา เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า 2:1 phyllosilicate แต่ชั้นจะมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 1000 เท่า ทำให้มีค่า aspect ratio สูง เหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์ ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็ก เรียกว่า แกลลอรี่ (gallery) [10,11] ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [13]

พื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) จะมีประจุลบ แต่ชั้นเหล่านี้สามารถยึดเกาะกันได้ด้วยประจุบวก เช่น โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และแคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^+$ ) จะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น

มอนต์มอริลโลไนต์และแร่ในกลุ่มของอะลูมิโนซิลิเกตอื่นๆ โดยธรรมชาติจะมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้แร่ในกลุ่มนี้ยากที่จะนำไปผสมและเกิดปฏิกิริยากับเนื้อพอลิเมอร์ และยิ่งไปกว่านั้น ชั้นที่ซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบของแผ่นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ยึดกันอย่างแน่นหนาด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในรูปที่ 2.19 คู่ไอออน (counterions) จะถูกดึงดูดด้วยประจุลบในแผ่นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ คู่ไอออนนี้สามารถดึงดูดแผ่นโครงสร้างสองแผ่นเข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นที่ซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบของแผ่นโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ยึดกันอย่างแน่นหนายิ่งขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (modified montmorillonite) ก่อนที่จะนำไปผสมเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อที่จะทำให้ชั้นแผ่นโครงสร้างของเคลย์เกิดการแยกชั้นสามารถเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.19 การยึดติดกันระหว่างชั้นของเคลย์กับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ [14]

มอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ซึ่งจะทำให้สมบัติบางประการของพอลิเมอร์ดีขึ้น เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength), ความทนทานต่อการดัดโค้ง (flexural strength), ความทนทานต่อความร้อน (heat resistance) เป็นต้น ซึ่งได้มีการเปิดเผยครั้งแรกโดยทีมงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น คือ โตโยต้า (Toyota) โดยการนำเอามอนต์มอริลโลไนต์มาเสริมแรงให้กับในลอน 6 แล้วพบว่าทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นกว่าการใช้ในลอนเพียงอย่างเดียว

การทำคอมพอสิตโดยปราศจากการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ก่อน จะทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่ไม่มีประสิทธิภาพเพราะเคลย์ทั้งหมดจะเกาะติดยึดอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเนื้อพอลิเมอร์ได้ วิธีการที่ง่ายที่สุดในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือการทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) โดยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (organic cationic) เช่น เกลือควอเทอร์นารีของอัลคิลแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) หรือเกลือฟอสโฟเนียม (phosphonium salt) จะสามารถเข้าแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน ทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เรียกว่า ออร์กาโนเคลย์ (organoclay)

ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน (quaternary ammonium ion) มีสายโซ่อัลคิลที่ยาว (long alkyl chain) ซึ่งเป็นส่วนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อเข้าไปแทนที่  $\text{Na}^+$  ที่อยู่ระหว่างชั้นของดินจะทำให้ได้ออร์กาโนเคลย์ที่มีสมบัติเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดี

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกทำให้ช่องแกลเลอรี (gallery) ขยายออก นั่นคือระยะห่างระหว่างชั้นของดินจะเพิ่มมากขึ้นทำให้ดินเกิดการบวมตัว เรียกออร์กาโนเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่า การแยกตัวแบบแทรกสอด (intercalated clay) แต่ถ้าชั้นของดินเกิดการบวมตัวมากจนทำให้เกิดการแยกชั้นของดินออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งจะเรียกว่า การแยกตัวออกจากกัน (exfoliated clay) ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดเล็กมาก ระดับนาโนเมตร สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยจะก่อให้เกิดการเสริมแรงในระดับโมเลกุล



### 2.6.1 ประโยชน์ของแรมอนต์มอริลโลไนต์

จากการที่กลุ่มนักวิจัยของโตโยตา (Toyota) ได้ค้นพบการทำนาโนคอมพอสิตระหว่างมอন্ต์มอริลโลไนต์และไนลอน 6 แล้วนำไปใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ จึงทำให้การเตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างเคลย์และพอลิเมอร์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมอন্ต์มอริลโลไนต์มีสมบัติพิเศษที่สามารถดัดแปรจนมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรจนสามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ทั้งมอন্ต์มอริลโลไนต์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ดังนี้ สมบัติเชิงกล, สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติด้านการกัดกร่อน นอกจากนี้พบว่า แรมอนต์มอริลโลไนต์ในนาโนคอมพอสิตช่วยเพิ่มความต้านทานสารเคมี ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และช่วยให้วัสดุมีความสามารถในการหน่วงไฟอีกด้วย ในการเตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างเคลย์และพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อทำการเติมปริมาณเคลย์ระหว่าง 2-5% จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีเท่ากับการเตรียมคอมพอสิตแบบทั่วไปที่เติมสารเสริมแรงปริมาณ 30-40% [10]

### 2.7 กระบวนการผสม

กระบวนการผสมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การผสมด้วยการละลาย การผสมด้วยการหลอมเหลว และการผสมแบบแห้ง แต่อย่างไรก็ตาม การผสมด้วยการหลอมเหลวพอลิเมอร์นั้นเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวทำละลายซึ่งบางชนิดมีราคาแพง และไม่ต้องยุ่งยากกับการระเหยและควบคุมตัวทำละลาย

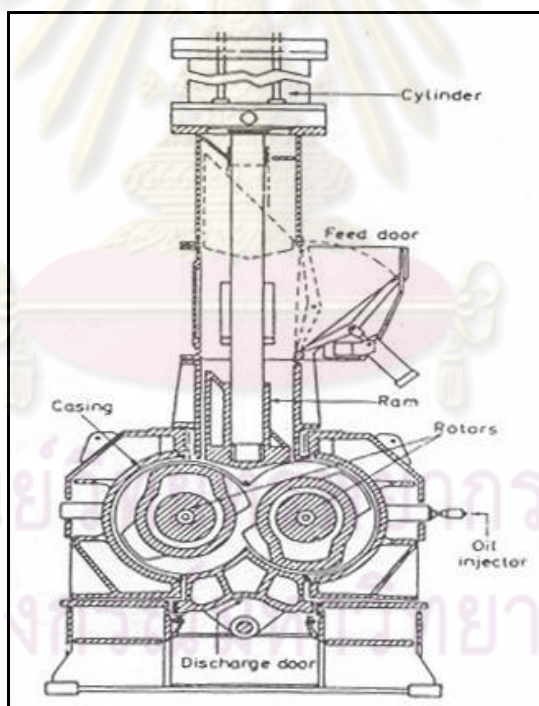
การผสมให้เข้ากันได้ดีไม่เพียงแต่จะทำให้ฟิลเลอร์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระดับมหภาค (macroscopic) เท่านั้น แต่ยังต้องทำให้ของผสมมีขนาดลดลงและเข้ากันได้ดีในระดับโมเลกุลด้วย ดังนั้นการผสมด้วยการหลอมเหลวจึงต้องทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการอ่อนตัวลง และสามารถเคลื่อนตัวได้ตามอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ควบคุมจนเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ตามต้องการ

โดยทั่วไป สามารถแบ่งการผสมออกเป็น 2 ชนิด คือ การผสมภายในแบบที่ละซุด (internal batch mixer) เช่น เครื่องผสมแบบแบนบิวรี่ (banbury mixer) และการผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing) เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ [8]

### 2.7.1 การผสมภายในแบบที่ละเอียด

การผสมแบบที่ละเอียดทำโดยการผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้ใบกวน 2 ใบ หมุนทวนกัน พร้อมทั้งให้ความร้อนเพื่อหลอมเหลวส่วนผสม จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปบดให้มีขนาดเล็กกลง และนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ

เครื่องผสมแบบแบนบิวรี (banbury mixer) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นต้นแบบการผสมภายในแบบที่ละเอียด โดยมีความสามารถในการผสมสูง ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ซับซ้อน (complex shearing) และมีการไหลแบบยืดดึง (elongational flow) จึงเหมาะสมกับการกระจายอนุภาคของแข็งที่จับตัวเป็นก้อนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้เป็นอย่างดี เช่น การผสมคาร์บอนแบล็ค (carbon black) ในยาง การกระจายอนุภาคที่จับตัวกันเป็นก้อนนี้ ขึ้นกับเวลาในการผสม ความเร็วของใบกวน อุณหภูมิ และรูปทรงของใบกวนในการผสม



รูปที่ 2.20 เครื่องผสมแบบแบนบิวรี [15]

### 2.7.2 การผสมแบบต่อเนื่อง

การผสมแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย การผสมเชิงกลอย่างหยาบภายนอกเครื่องผสมนี้ก่อน แล้วตามด้วยการบดส่วนผสมเข้าไปในเครื่องผสม จากนั้นทำให้เย็นตัวลง แล้วตัดเป็นเม็ดนำไปขึ้นรูปต่อไป

การผสมแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.21 พอลิเมอร์อาจจะอยู่ในรูปเม็ดหรือผงก็ได้ ซึ่ง จะทำการบดส่วนผสมนี้ผ่านกรวยเติม (hopper) ลงสู่สกรู (screw) จากนั้นพอลิเมอร์จะเคลื่อน ตัวภายในกระบอกอัดรีด (barrel) ที่มีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแถบให้ความร้อน (band heaters) รวมทั้งความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของพอลิเมอร์ด้วยกัน และความร้อนที่เกิดจากการ เสียดสีของพอลิเมอร์กับเครื่องอัดรีด ความลึกของร่องสกรูจะลดลงตามความยาวของสกรู เพื่อเป็น การเพิ่มความดันให้แก่พอลิเมอร์หลอมเหลว จากนั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะไหลออกจากหัวตาย (die) ที่อาจจะมีรูปแบบต่างๆ ตามต้องการ เช่น ฟิล์ม แผ่น ท่อกลวง ท่อตัน เป็นต้น

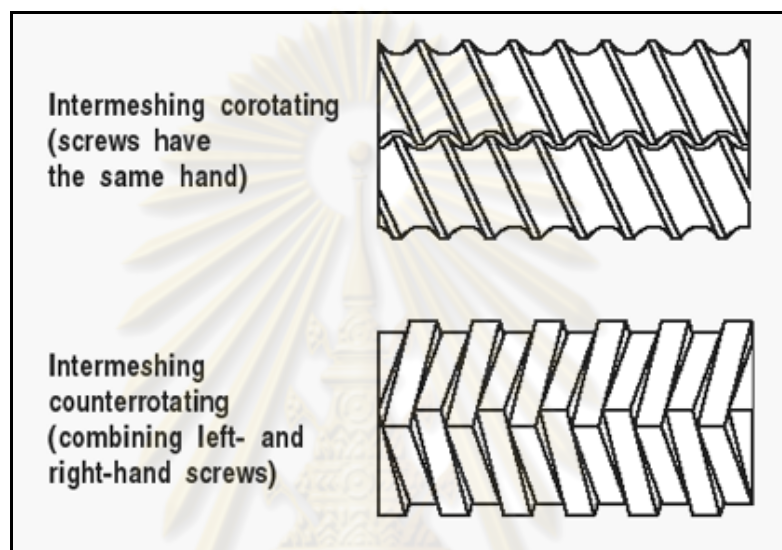
การผสมด้วยเครื่องอัดรีดให้มีประสิทธิภาพและเข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) ได้นั้น นอกจากจะขึ้นกับสมบัติของวัตถุดิบเองแล้ว ยังประกอบด้วยอุณหภูมิที่ใช้ ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ในช่วงต่างๆ กันของกระบอกอัดรีด ความเร็วรอบสกรู การออกแบบ สกรูและหัวตาย เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งเครื่องอัดรีดตามจำนวนของสกรูได้เป็นเครื่องอัดรีด สกรูเดี่ยวและสกรูคู่ [16]



รูปที่ 2.21 เครื่องอัดรีด [17]

ปัจจุบันเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวมีการนำไปใช้งานด้านต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีการผลิตที่ ง่าย ราคาไม่แพงและง่ายต่อการดูแลรักษา การออกแบบสกรูก็สามารถทำได้ง่าย และใช้กับ

พอลิเมอริ์ได้หลายชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ซึ่งมีสกรู 2 ตัวหมุนคู่กันในกระบอกรัดรีด เมื่อพิจารณาจากส่วนพื้นของสกรูที่มีลักษณะขบกันอยู่นั้น สามารถแบ่งเครื่องอัดรีดสกรูคู่ได้เป็น 2 ชนิดคือ เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียว (co-rotating twin screw extruder) และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin screw extruder) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ประเภทสกรูของเครื่องอัดรีดสกรูคู่ [17]

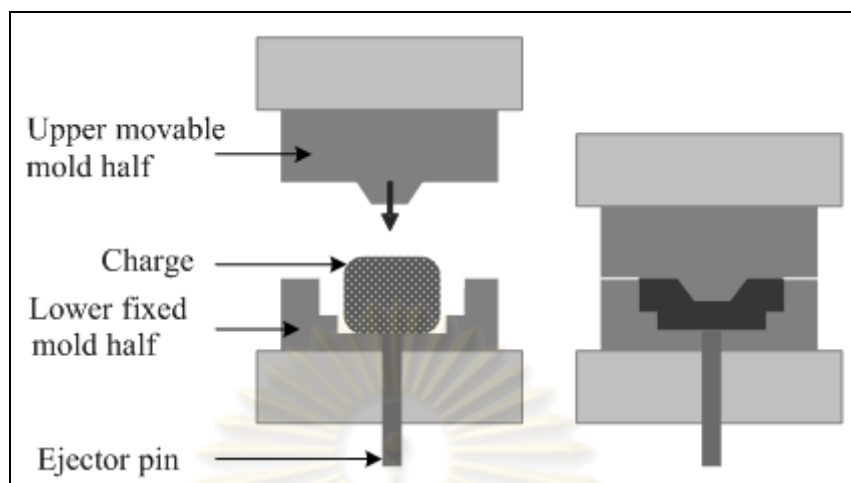
โดยเฉพาะแบบที่มีทิศทางการหมุนของสกรูสวนทางกัน พบว่าเครื่องอัดรีดสกรูคู่มีความยากในการผลิตมากกว่า มีราคาและค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงกว่าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว แต่เนื่องจากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่า เมื่อทำการผสมพอลิเมอริ์ในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว จะมีการไหลแบบลากพา (drag flow) ของเม็ดพลาสติกบริเวณสกรูกับผนังของกระบอกรัดรีด ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสี จึงยากต่อการควบคุมอุณหภูมิของการหลอมเหลว ในขณะที่เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีการไหลในลักษณะคล้ายปั๊ม ความร้อนส่วนใหญ่จะได้รับจากแถบทำความร้อนที่ผนังของกระบอกรัดรีด ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนสู่พอลิเมอริ์ที่เคลื่อนที่ในกระบอกรัดรีดนี้จึงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และลดปัญหาที่เกี่ยวกับความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี จึงนิยมนำเครื่องอัดรีดสกรูคู่ไปใช้ในการผลิตพอลิเมอริ์ที่ไวต่อความร้อน เช่น พีวีซี โดยได้มีการเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบ  
หมุนทางเดียวกัน และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน

ชนิดของเครื่องอัดรีด	สกรูเดี่ยว	สกรูคู่หมุนทางเดียว		สกรูคู่หมุนสวนทาง
		ความเร็วต่ำ	ความเร็วสูง	
หลักการ	แรงเสียดสีระหว่างกระบอกอัดรีดกับพอลิเมอร์และพอลิเมอร์กับสกรู	ขึ้นกับแรงเสียดสีเหมือนในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	ขึ้นกับแรงเสียดสีเหมือนในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เกิดโดยหลักการของปั๊ม
การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
การผสม	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง-สูง	สูง
แรงเฉือน	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
การทำความสะดวกด้วยพอลิเมอร์เองขณะผสม	น้อย	ปานกลาง-สูง	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง-สูง	สูง
ความร้อนที่เกิดขึ้น	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ

## 2.8 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่แบบ

กระบวนการอัดเข้าแม่แบบ (compression molding) เป็นกระบวนการอัดเข้ากับแบบ ซึ่งโดยทั่วไปตัวแบบเองจะมีการทำให้ร้อนก่อน แล้วใช้เม็ดพลาสติกใส่ลงไปแม่แบบ เมื่อแบบเข้าประกบกัน จะมีการรักษาความร้อนและความดันให้คงที่จนกว่าเม็ดพลาสติกจะเข้าเต็มแบบและทำให้แข็งตัว กระบวนการนี้เหมาะที่จะใช้กับ Thermosetting polymers เพราะการทำให้แข็งตัวสำหรับ Thermosetting polymers นั้นขึ้นอยู่กับเวลาของการเกิดปฏิกิริยาและมักจะใช้เวลาานกว่ากระบวนการผลิตแบบฉีด [18]

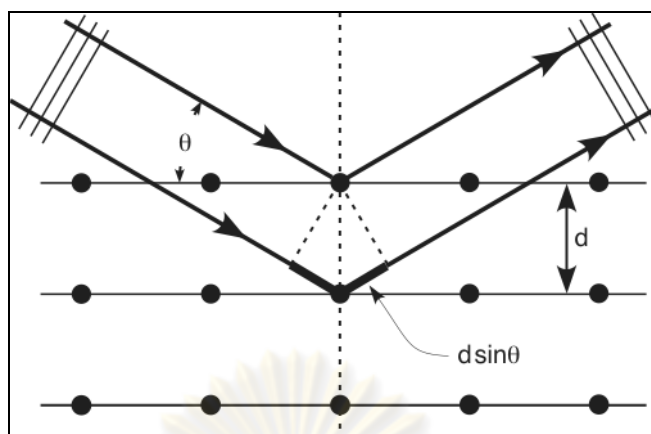


รูปที่ 2.23 เครื่องอัดแบบ [19]

## 2.9 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

เทคนิคการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่าความเข้ม แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของแบรกก์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกจำเป็นต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงหรือน้อยกว่าขนาดของอะตอม แสงที่มีความยาวคลื่นขนาดดังกล่าวได้แก่ รังสีเอ็กซ์ ซึ่งได้จากการยิงอะตอมของธาตุ (เช่น โคบอลต์ หรือ โมลิบดีนัม) ด้วยลำอิเล็กตรอน นอกจากรังสีเอ็กซ์แล้ว รังสีที่ใช้ก็ได้แก่ รังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู รังสีซินโครตรอนซึ่งเป็นรังสีที่เปล่งออกมาโดยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบอะตอมหรือไอออนภายในโครงสร้างของสารที่นำมาตรวจสอบ จะเกิดการกระเจิงประพุดิตัวคล้ายกับการสะท้อนออกจากระนาบของแลตทิซผลึก ดังนั้นจึงสามารถใช้กฎการสะท้อนเช่นเดียวกับการสะท้อนจากกระจกเงา นั่นคือ มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนของแสง คลื่นแสงที่จะเกิดการรวมตัวแบบเสริมกันจะต้องเป็นคลื่นที่มีเฟสเหมือนกัน นั่นคือ ความแตกต่างของระยะทางที่คลื่นเหล่านั้นเคลื่อนที่ ต้องเท่ากับเลขจำนวนเต็มคูณด้วยความยาวคลื่น ดังแสดงในสมการแบรกก์ (Bragg Equation) [10]



รูปที่ 2.24 อธิบายสมการแบรกก์ที่ใช้ในเทคนิค XRD [20]

$$\text{สมการของแบรกก์} \quad n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.2)$$

โดยที่  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

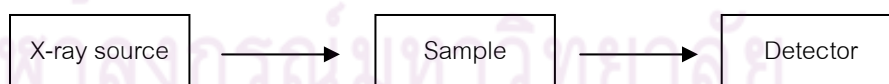
$n$  = เลขจำนวนเต็ม

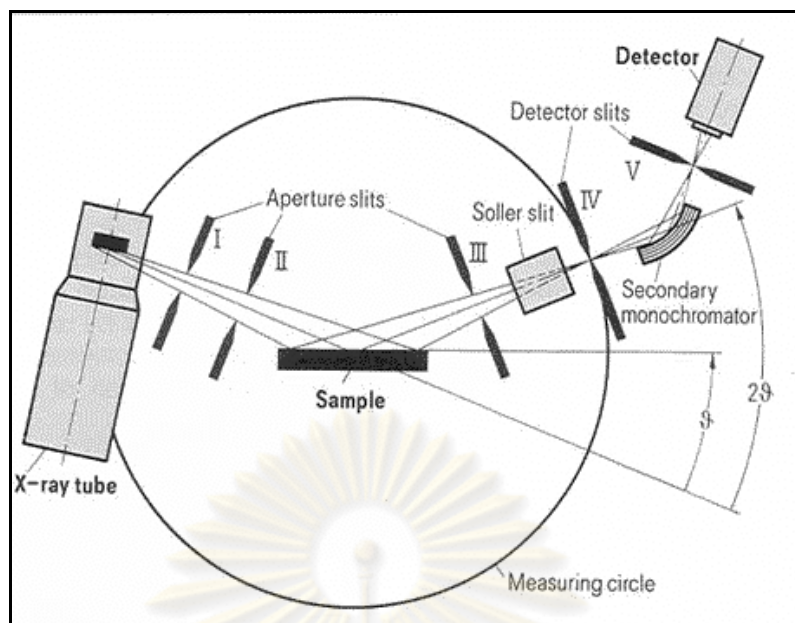
$d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

$\theta$  = มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์

จากสมการที่ 2.2 สามารถอธิบายการสะท้อนรังสีเอ็กซ์จากระนาบของผลึก ซึ่งระยะทางที่แสงเดินทางจากระนาบทั้งสองหรือ  $2d \sin\theta$  ต้องเท่ากับ  $n\lambda$

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกซึ่งประกอบด้วยอะตอมที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ รังสีเอ็กซ์จะเกิดการสะท้อนจากอิเล็กตรอนด้วยมุมต่างๆ กัน เข้าเครื่องตรวจวัด เครื่องตรวจวัดจะวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่มุมสะท้อนต่างๆ (ซึ่งมีค่าเท่ากับมุมตกกระทบ) และให้ผลออกมาเป็นแพทเทิร์นระหว่างมุมตกกระทบกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์





รูปที่ 2.25 หลักการทำงานของเครื่อง XRD โดยสังเขป [21]

จากรูปที่ 2.25 สามารถสรุปหน้าที่การทำงานของเครื่องมือแต่ละส่วนได้ดังนี้

X-ray source เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ภายในประกอบด้วยเป้าโลหะทองแดง

( $K\alpha$  เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม)

Sample เป็นสารที่นำมาใช้ตรวจสอบประเภทวัสดุที่มีผลึก (crystalline material) โดยอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์

Detector ใช้ตรวจวัดการหักเหของรังสีเมื่อตกกระทบสาร

ดังนั้นสิ่งที่ได้จากการทดสอบประกอบด้วย

- 1) มุมหรือทิศทางของแสงสะท้อน ( $2\theta$ ) สำหรับคำนวณหาขนาดหน่วยเซลล์ได้
- 2) ความกว้างของพีค ( $B$ ) สำหรับคำนวณหาความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง
- 3) ความเข้มแสงสะท้อน ( $I$ ) สำหรับคำนวณหาตำแหน่งของอะตอมภายในหน่วยเซลล์

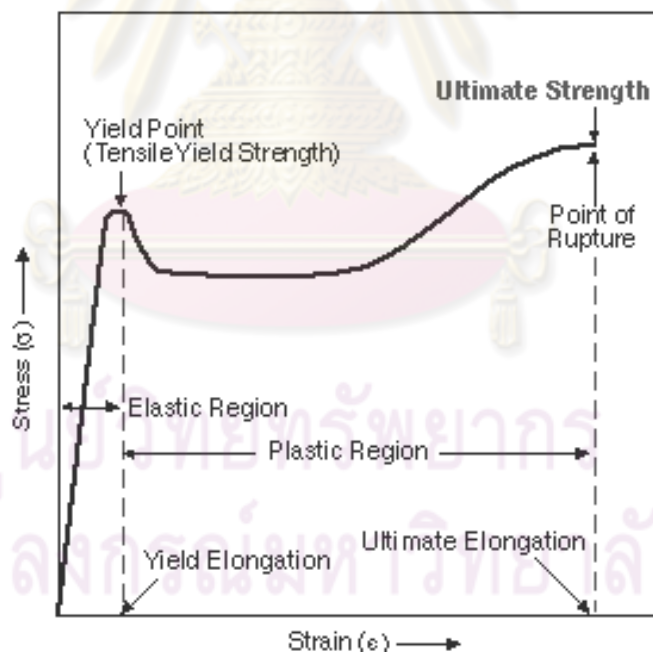
นอกจากนี้ยังมีค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น พารามิเตอร์การสั่น การกระจายของอิเล็กตรอน เป็นต้น



## 2.10 สมบัติเชิงกลของพลาสติก

### 2.10.1 สมบัติด้านแรงดึง

ความทนแรงดึงของวัสดุแสดงถึงความต้านทานต่อการยืด (elongation) หรือการแตกหัก (breaking) ของวัสดุนั้นเมื่อได้รับแรงดึง การวัดความทนแรงดึงของพลาสติกเป็นการวัดที่มีประโยชน์ที่สุดแบบหนึ่ง ตามมาตรฐาน ASTM D638-03 นั้น ใช้ชิ้นทดสอบที่มีรูปดัมเบลล์ ปลายทั้งสองข้างของชิ้นทดสอบถูกยึดเข้ากับหัวจับของเครื่องทดสอบ และใช้แรงดึงที่ทราบค่าดึงหัวจับทั้งสองให้เคลื่อนออกจากกันด้วยอัตราเร็วคงที่ พลาสติกที่ทดสอบจะยืดออกในแนวเดียว (uniaxial) และขาดจากกันบริเวณส่วนกลางที่แคบของชิ้นงานภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทำให้ได้กราฟระหว่างแรงและการยืด (load-elongation curve) ซึ่งนิยมแสดงออกในรูปความเครียดและความเค้น (stress-strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.26 [22]



รูปที่ 2.26 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดทั่วไปในการทดสอบความทนแรงดึงของพลาสติก [23]

เมื่อออกแรงดึง ( $F$ ) ให้กับชิ้นทดสอบ สามารถคำนวณหาความเค้นดึง (tensile stress) ได้จากสมการต่อไปนี้

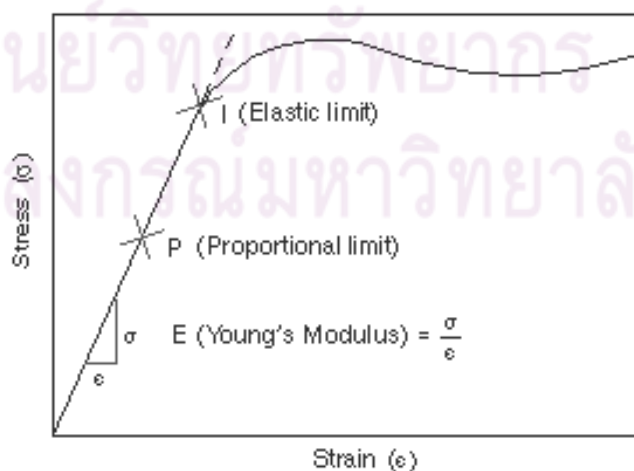
$$\sigma = F/A \quad (2.3)$$

- โดยที่  $\sigma$  คือ ความเค้นดึง (tensile stress) มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตันต่อตารางเมตรหรือปาสคาล
- $F$  คือ แรงดึง ในหน่วยของแรง เช่น นิวตัน หรือ กิโลกรัม
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด เช่น ตารางเมตร หรือ ตารางมิลลิเมตร
- ค่าความเค้นดึงทำให้เกิดการยืดของชิ้นงานจาก  $L_0$  เป็น  $L$  นั่นคือชิ้นงานมีความเครียดดึง (tensile stress,  $\epsilon$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = (L-L_0)/L_0 = \Delta L/L_0 \quad (2.4)$$

เมื่อออกแรงดึงต่อวัสดุ วัสดุจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติก คือ เมื่อเอาแรงออก วัสดุสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม (reversible change) จนเมื่อดึงผ่านขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ไปแล้วจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีกเมื่อเอาแรงออก และหลังจากนี้จะเรียกว่า strain harden คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งขาดออกจากกัน จะได้ค่าความเค้นดึงสุดท้าย ซึ่งเรียกว่า ultimate tensile stress

มอดุลัส (modulus) หรือมอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus,  $E$ ) หรือมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือยังมอดุลัส (Young's modulus) เป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเค้น ค่ามอดุลัสเป็นค่าที่วัดความแข็งแกร่งหรือความแข็งดึง (stiffness) ของพลาสติกซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ขณะรับแรง



รูปที่ 2.27 แผนภาพความเค้น-ความเครียด และเส้นสัมผัสเริ่มแรกที่ใช้หาค่ามอดุลัส [23]

การหาค่ามอดูลัสจากกราฟความเค้น-ความเครียดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.27 โดยหาค่ามอดูลัสแบบยืดหยุ่น ( $E$ ) ได้จากการวัดความชัน (slope) ของเส้นสัมผัสเริ่มแรกซึ่งเป็นส่วนที่ชันที่สุดของเส้นโค้ง

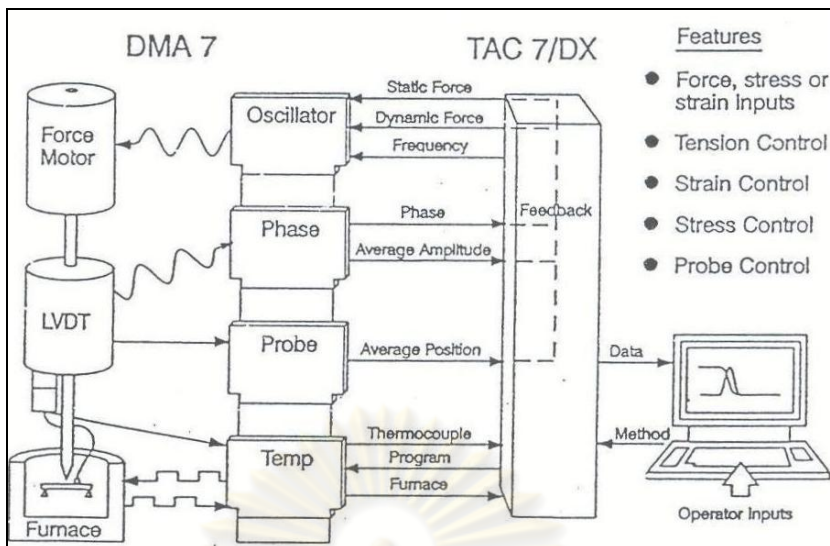
Yield stress เป็นความเค้นที่จุดคราก (yield point) ซึ่งจุดครากเป็นจุดแรกบนเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่เกิดจากการเพิ่มความเครียดโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น เมื่อวัสดุถูกดึงถึงจุดครากแล้ว จะไม่สามารถคืนตัวได้อีกเมื่อเอาแรงกระทำออกไป

พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงความเหนียว (toughness) ของพลาสติก เป็นพลังงานทั้งหมดที่ทำให้พลาสติกเกิดการแตกหัก พลาสติกที่มีพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดมากเป็นวัสดุที่มีความเหนียว ส่วนวัสดุที่เปราะจะมีพื้นที่ใต้เส้นโค้งน้อย

### 2.10.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis, DMA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุ และสามารถใช้ในการศึกษาวิทยาการกระแส (rheology) ของวัสดุ ซึ่งเป็นการศึกษาการเสียรูป (deformation) และการไหล (flow) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ ไม่ว่าจะเป็นด้วย constant stress, sinusoidal stress หรือ variable stress (steady shear) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัสดุที่เป็นวัสดุยืดหยุ่น (viscoelastic) เช่น พอลิเมอร์ ซึ่งมีพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, เวลา และความถี่ของแรงที่กระทำ กล่าวคือ เทคนิคนี้เป็นการวัดมอดูลัสสะสม (storage modulus) และมอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) ของชิ้นทดสอบ ภายใต้ oscillating load เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ, เวลา และความถี่ของ oscillation ในขณะที่ชิ้นทดสอบถูกควบคุมภายใต้สภาวะการทดสอบ การทดลองโดยส่วนมากมักเป็นไปในลักษณะที่กำหนดให้ dynamic strain คงที่มากกว่าให้ความเค้นคงที่

ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาวิทยาการกระแสของวัสดุพอลิเมอร์ คือ สามารถตรวจสอบสมบัติของวัสดุดิบเพื่อทำนายการขึ้นรูป (processibility) และสามารถตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์เพื่อทำนายการตอบสนองต่อการใช้งาน (end-use performance) [24]



รูปที่ 2.28 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต [25]

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตใช้วัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น มอดุลัส และ  $\tan \delta$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ เวลา ความถี่ ความดัน หรืออิทธิพลร่วมของตัวแปรเหล่านี้ สมบัติเชิงกลที่วัดได้จะเป็นแบบไดนามิกส์ คือ สมบัติเชิงกลของวัสดุขณะที่อยู่ภายใต้แรงที่เป็นช่วง (periodic force) ในการวัดจะแยกสมบัติของวิสโคอีลาสติกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีลักษณะยืดหยุ่น (การดูดซับพลังงาน) และส่วนที่มีลักษณะไหลหนืด (การกระจายพลังงาน) โดยเมื่อให้แรงที่เป็นช่วงกระทำต่อวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ วัสดุนั้นจะตอบสนองต่อแรงในลักษณะที่ความเครียดเกิดตามหลังเฟสของความเค้นเป็นมุม  $90^\circ$  ในกรณีของวิสโคอีลาสติก ความเครียดจะเกิดตามหลังเฟสความเค้นเป็นมุม  $\delta$  โดยที่  $0^\circ < \delta < 90^\circ$  โดยจากสมการที่ 2.5 สามารถใช้ในการคำนวณสมบัติของวัสดุที่เป็นวิสโคอีลาสติกได้

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$E^* = E' + iE'' \tag{2.5}$$

- |     |                             |  |
|-----|-----------------------------|--|
| โดย | Complex modulus ( $E^*$ ) = | มอดุลัสของวัสดุที่เป็นวิสโคอีลาสติก  |
|     | Storage modulus ( $E'$ ) =  | อัตราส่วนของอำพัน (amplitude) ของความเค้นต่อความเครียดที่มีเฟสตรงกัน             |
|     | Loss modulus ( $E''$ ) =    | อัตราส่วนของอำพัน (amplitude) ของความเค้นต่อความเครียดที่มีเฟสต่างกัน $90^\circ$ |

ค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่ง เรียกว่า ลอส-แทนเจนท์ (loss tangent) เป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนของการแสดงสถานะของการเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะการณียืดหยุ่นหรือมอดุลัสสูญเสียต่อมอดุลัสสะสม ดังแสดงในสมการที่ 2.6 นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าลอส-แทนเจนท์ ยังใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะคล้ายแก้วไปสู่สถานะคล้ายยาง หรือสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน เช่น ถ้าชิ้นงานมีค่าลอส-แทนเจนท์สูง แสดงว่าชิ้นงานมีลักษณะนิ่มและมีความทนแรงกระแทกสูง หรือถ้าชิ้นงานมีค่าลอส-แทนเจนท์ต่ำ แสดงว่าชิ้นงานมีลักษณะแข็งตึงและมีมอดุลัสสูง [9]

$$\text{loss tangent } (\tan \delta) = E''/E' \quad (2.6)$$

โดย loss tangent ( $\tan \delta$ ) = อัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียไปต่อพลังงานที่เก็บไว้ใน 1 รอบ

## 2.11 สมบัติทางความร้อน

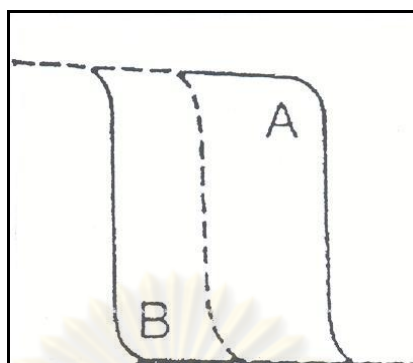
สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น พอลิเมอร์กิ่งผลึก พอลิเมอร์อสัณฐาน และภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยสมบัติทางความร้อนที่รู้จักกันดีของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) เป็นต้น [8]

โดยทั่วไปลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่พอลิเมอร์อสัณฐานเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วกลายเป็นสถานะที่อ่อนนิ่มคล้ายยาง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันนั้นถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมชนิดนั้นๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.29 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน พบว่า ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุล พอลิเมอร์ผสมจะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แคบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.29 (ก) แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถเข้ากันได้จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2

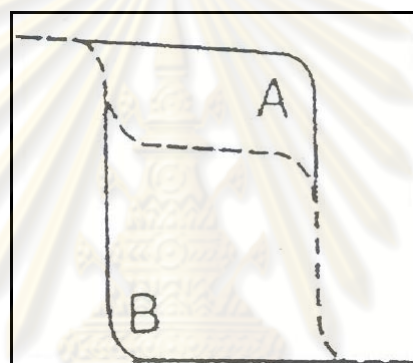
ตำแหน่ง และมีการเปลี่ยนแปลงที่แคบซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.29 (ข) แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเข้ากันได้บางส่วน พอลิเมอร์ผสมจะแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งแสดงถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่กว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันได้เพียงบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.29 (ค)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างการให้ความร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ เช่น การหลอมเหลว การเกิดผลึก อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การสลายตัว ปฏิกริยาเคมีอื่นๆ เช่น การกลายเป็นไอ แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและจุดหลอมเหลวถือเป็นการตรวจสอบที่สำคัญ ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบคือ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมนั้นนิยมวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)

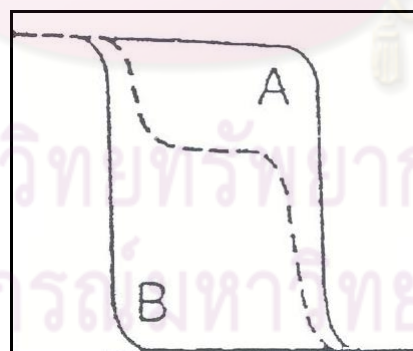
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)



(ค)

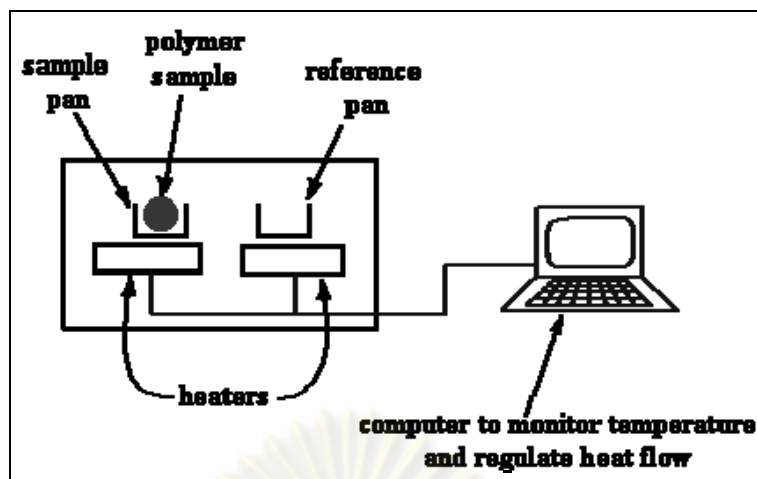
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม A และ B ที่อัตราส่วน 50:50 (เส้นประ) โดยเส้นทึบแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละตัว [9]

### 2.11.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

การตรวจสอบอุณหภูมิทรานซิชันต่างๆของพอลิเมอร์นั้นสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการดูดหรือคายความร้อน ซึ่งสามารถวัดจากความแตกต่างของพลังงาน (energy) หรือการไหลของความร้อน (heat flow) ระหว่างสารทดสอบและสารอ้างอิงเป็นฟังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ให้แก่สารทั้งสองนั้นถูกกำหนดไว้ ณ บรรยากาศการทดสอบ คือ DSC เป็นเทคนิคที่สามารถบอกขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของความร้อนในระบบที่สัมผัสกับปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และ/หรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนหรือทำให้เย็นตัวลง โดย DSC สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายอย่าง ได้แก่ ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน หรืออุณหภูมิลอมเหลว ระดับการเชื่อมขวางในเทอร์โมเซตพลาสติก เสถียรภาพทางความร้อน ความบริสุทธิ์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น [8]

ในการตรวจสอบอุณหภูมิทรานซิชันต่างๆของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีนั้น เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและเซลล์อ้างอิงจะถูกวางไว้บนตัวทำความร้อน และในขณะที่ให้ความร้อนแก่เซลล์ด้วยอัตราเพิ่มหรือลดอุณหภูมิที่กำหนด ตัวทำความร้อนจะพยายามรักษาอุณหภูมิของเซลล์ให้เป็นไปตามอัตราที่กำหนด หลังจากนั้นเครื่อง DSC จะนำข้อมูลทางความร้อนของสารตัวอย่างที่ได้มาคำนวณ ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิทรานซิชันของสารตัวอย่างได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.30 [24]





รูปที่ 2.30 การวิเคราะห์โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี [26]

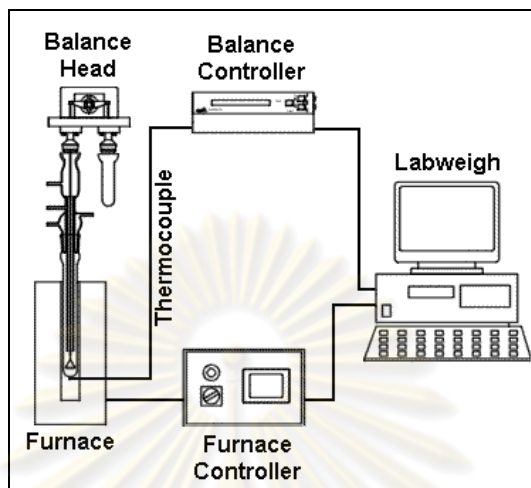
### 2.11.2 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส

การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA) เป็นเทคนิคที่ทำให้ทราบข้อมูลของพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ ได้แก่ เสถียรภาพทางความร้อน รูปแบบการสลายตัวของพอลิเมอร์ และปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ [8]

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส เป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในแบบอัตราคงที่หรือกับเวลาในสภาวะอุณหภูมิคงที่ เช่น ในการเกิดการสลายตัว การเกิดออกซิเดชัน การระเหยกลายเป็นไอ แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาทางความร้อนที่เกิดขึ้นในบางกรณี อาจจะไม่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลเสมอไป เช่น การเกิดผลึก การหลอมเหลว หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยการใช้งานส่วนใหญ่ใช้ในการวิเคราะห์การสลายตัวและเสถียรภาพทางความร้อนภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

วิธีนี้มวลของสารทดสอบจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่คงที่ น้ำหนักของสารทดสอบหรือพอลิเมอร์ที่ทำการวิเคราะห์จะลดลง เนื่องจากการระเหยของพอลิเมอร์ที่มีการสลายตัวเกิดขึ้น ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบนี้จะต้องมีความแม่นยำสูงมาก ไม่เพียงแต่จะต้องวัดน้ำหนักจำนวนน้อยที่ลดลง แต่ยังต้องหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความหนาแน่นของอากาศในเครื่องวิเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้สารที่ระเหยออกมา

จะต้องไม่ไปจับกับส่วนวัดน้ำหนักของเครื่องวิเคราะห์ จึงจำเป็นต้องควบคุมบรรยากาศ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่วัดได้อีกด้วย [24]



รูปที่ 2.31 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส [27]

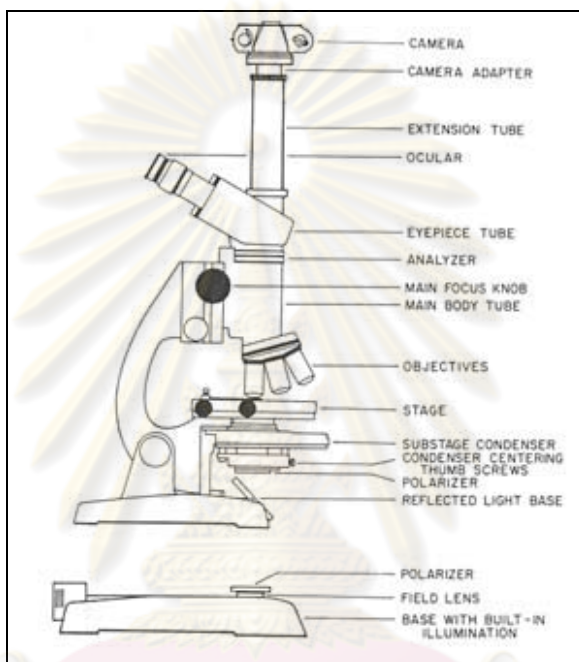
## 2.12 สัณฐานวิทยา

เพื่อความเข้าใจสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้ดียิ่งขึ้น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างหรือสัณฐานวิทยา และสมบัติของพอลิเมอร์ผสมเป็นสิ่งจำเป็น โดยมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การใช้กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope, OM) และการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

### 2.12.1 กล้องจุลทรรศน์

การใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นเทคนิคที่สำคัญในการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเตรียมตัวอย่างได้ง่ายไม่ยุ่งยาก แต่ความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้ถูกจำกัดด้วยความยาวคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้ และประสิทธิภาพของเลนส์วัตถุซึ่งสามารถแยกความแตกต่างได้ดีที่สุดในระดับ 2 ไมโครเมตรเท่านั้น ดังนั้นประสิทธิภาพของกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้จึงเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาการผสมที่ไม่มีความเข้ากัน แต่ไม่เพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาการผสมที่มีความสามารถในการเข้ากันได้ หรือเข้ากันได้

บางส่วน และปัญหาหลักของกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่าง โดยเฉพาะในกรณีที่พอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นวัสดุที่มีความอ่อนนุ่ม การตัดหรือบดบอยครั้งทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเกิดความเสียหาย ในบางกรณีจำเป็นต้องตัดชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  หรือน้อยกว่า เพื่อป้องกันพื้นผิวของชิ้นงานเกิดความเสียหาย โดยลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.32 [8]

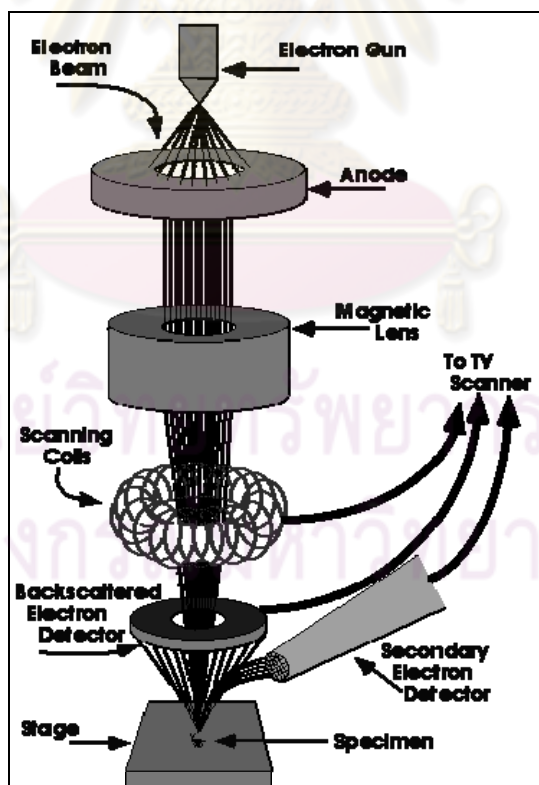


รูปที่ 2.32 กล้องจุลทรรศน์ [28]

### 2.12.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการศึกษาเฟสของพอลิเมอร์ผสม รวมทั้งขนาดและการกระจายตัวในดิสเพอร์สเฟส ตลอดทั้งแรงดึงดูดระหว่างผิวของแต่ละเฟส โดยในการตรวจสอบจำกัดอยู่ในระดับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไป โดยการเตรียมชิ้นตัวอย่างนั้นส่วนมากใช้วิธีหักชิ้นตัวอย่างภายใต้สภาวะไนโตรเจนเหลว เพื่อป้องกันความเสียหายของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ดีควรจะเรียบ [8]

มีปัญหา 2 อย่างในการตรวจสอบวัสดุพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ประการแรก คือ พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำมาก และประจุถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็วบนชิ้นทดสอบเมื่อมันถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอน ถ้าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด สนามอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยประจุกระทบกับลำอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนที่สร้างสัญญาณจะเกิดการรบกวนภาพได้ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเคลือบผิวชิ้นทดสอบด้วยสารซึ่งนำไฟฟ้าได้ (conductive coating) ปัญหาอย่างที่สองคือ วัสดุพอลิเมอร์มักถูกทำลายด้วยพลังงานจากการทะลุทะลวงของอิเล็กตรอนทำให้เกิดรอยตำหนิ (artifacts) ขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ควรใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งทำให้กำลังขยายและความละเอียดลดลง ปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดต้องการชิ้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 ตารางมิลลิเมตร) โดยวัสดุที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวหน้าของชิ้นทดสอบคือ ทองคำ เพราะเป็นวัสดุระเหยได้ง่าย ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [29]

## 2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Potschke P. และคณะ [30] เตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนทั้งชนิดที่เป็นอีเทอร์และชนิดที่เป็นเอสเทอร์/พอลิโอฟีนส์ชนิดต่างๆ ในสภาพหลอมเหลว พบว่าสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ จะได้กราฟความทนแรงดึงที่มีลักษณะเป็นรูปตัว U โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 40 และ 60% ของปริมาณพอลิโอฟีนส์ นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโอฟีนส์จะมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิทีลีน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์และชนิดเอสเทอร์ที่มีความหนืดใกล้เคียงกัน จะพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์จะมีฐานวิทยาศาสตร์ที่ละเอียดกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเทอร์ เนื่องจากพลังงานอิสระที่ผิวของส่วนที่อ่อนนุ่มของพอลิอีเทอร์มีค่าต่ำกว่าพอลิเอสเทอร์ และจากฐานวิทยาศาสตร์ที่ต่างกันนี้จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์จะมีการลดลงของความทนแรงดึงน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเทอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์บริเวณรอยแตกของชิ้นงานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่าไม่เกิดการยึดติดที่บริเวณรอยต่อระหว่างสองเฟสเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโอฟีนส์มีพลังงานอิสระที่ผิวและความมีขั้วที่แตกต่างกัน จึงทำให้ทั้งสองเฟสไม่เข้ากัน ซึ่งความไม่เข้ากันของทั้งสองเฟสยังสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, DMA) และเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) โดยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตแสดงให้เห็นว่ามี  $T_g$  สองตำแหน่งซึ่งเป็นของพอลิเมอร์สองชนิดแสดงว่าพอลิเมอร์ผสมนี้มีการแยกเฟสกัน และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรีพบว่าการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโอฟีนส์ไม่ทำให้เอนทัลปีในการหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวขององค์ประกอบเกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโอฟีนส์นั้นเข้ากันได้ยากเนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกัน ต่อมา Di Y. และคณะ [31] ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโอฟีนส์ที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก และใช้

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม พบว่าการใส่สารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (polyethylene graft maleic anhydride, PE-g-MA) จะทำให้อนุภาคที่กระจายตัวอยู่มีขนาดเล็กลงและรอยต่อระหว่างเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพลีเอทิลีนมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใส่สารช่วยผสม แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีการยึดเกาะกันดีขึ้นซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สำหรับปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อสารช่วยผสมปริมาณมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้ความทนแรงดึงลดลง ซึ่งปรากฏการณ์ที่ความทนแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่นๆด้วย และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตพบว่าจุดสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยผสมจะอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่สารช่วยผสม แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใส่พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีการยึดติดระหว่างเฟสที่ดีกว่าเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณรอยต่อของสองเฟส ทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพลีเอทิลีนเข้ากันได้ดีขึ้น

นาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสารเสริมแรงขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านของแก๊ส สมบัติการทนไฟ และเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าวัสดุคอมพอสิตดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป การที่สารเสริมแรงมีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรทำให้มีพื้นที่ผิวมากสำหรับการเสริมแรง นอกจากนี้ยังทำให้ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสารเสริมแรงที่มีขนาดระดับไมครอนหรือใหญ่กว่า จึงทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงสูง

Cheol H.D. และคณะ [32] ศึกษาผลของชนิดของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและชนิดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของนาโนคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) และการวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) พบว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างเป็น intercalate และระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เปรียบเทียบกับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรทางการค้าชนิด C30B พบว่าจะทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแยกจากกัน ซึ่ง

การกระจายตัวที่ดีของชั้นซิลิเกตของเคลย์ชนิด C30B เกิดจากหมู่คาร์บอนิลในเทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทนทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเคลย์เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน และการกระจายตัวที่ดีของ ชั้น ซิลิเกตในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนส่งผลให้เกิดการปรับปรุงสมบัติเชิงกลในนาโน คอมพอสิต นอกจากนี้ยังพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรมีการกระจายตัวในเมทริกซ์ของ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์ได้ดีกว่าชนิดเอสเทอร์ จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์จะให้ความทนแรงดึงมีค่าสูงขึ้นและความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์จะมีค่าสูงกว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเทอร์ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการกระจายตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งอาจเป็นผลจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเทอร์มี ความหนืดสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดอีเทอร์ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากเคลย์ที่อยู่ในส่วน นิ้มของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์โพลีออลในกรณีของ นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดเอสเทอร์ นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ ทำการศึกษาผลของโครงสร้างออร์กาโนเคลย์และโครงสร้างทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนต่อ สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/เคลย์นาโนคอมพอสิต [33] พบว่า การใช้ออร์กาโนเคลย์ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเอทิล (hydroxyl ethyl) จะทำให้อุณหภูมิของเคลย์ กระจายตัวได้ดีที่สุดและสามารถเสริมแรงได้มากที่สุดด้วย ขณะที่การใช้เคลย์ที่ประกอบด้วยสายโซ่ แอลคิลสองสายจะทำให้อุณหภูมิของเคลย์กระจายตัวได้ไม่ดีจึงทำให้สามารถช่วยเสริมแรงได้น้อย ซึ่ง ผลนี้พบในนาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนทั้งชนิดอีเทอร์และเอสเทอร์ แต่นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีความแข็งมากจะมีการกระจายตัว ของเคลย์ที่ดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ พบว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการเตรียม นาโนคอมพอสิตโดยใช้ในลอน 6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้พอลิเมอร์ที่มีขั้วพวกพอลิเอไมด์และ พอลิยูรีเทนจะมีความเข้ากันได้ดีกับพื้นผิวของเคลย์ซึ่งมีขั้วเช่นกัน และในกรณีของพอลิยูรีเทน ออร์กาโนเคลย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเอทิลจะมีความเข้ากันได้สูงกับเมทริกซ์ ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี และเกิดโครงสร้างแบบแยกจากกัน

Lucilene B.P. และคณะ [34] เตรียมนาโนคอมพอสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (polypropylene graft maleic anhydride, PP-g-MA) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมเพื่อช่วยปรับปรุงกระบวนการเกิด intercalation เข้าไประหว่างชั้นเคลย์โดยนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้นั้นจะมีโครงสร้างแบบแทรกสอดหรือแบบแยกจากกันจะขึ้นกับปริมาณของเคลย์ที่เติมลงไป จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าการเติมเคลย์ปริมาณ 2.5% โดยน้ำหนัก จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตเพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแทรกสอด แต่ที่ปริมาณเคลย์ 5% ไม่พบพีคที่แสดงถึงระยะห่างของชั้นเคลย์ จึงน่าจะเป็นโครงสร้างแบบแยกจากกัน นอกจากนี้พบว่าการเติมเคลย์ปริมาณ 7.5 และ 10% จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตในเคลย์มากขึ้นเช่นกัน แต่ไม่มากเท่ากับที่ 2.5% ซึ่งเป็นผลมากจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคเคลย์และกระบวนการที่ใช้ในการผลิต และจากการวิเคราะห์ด้วยการใช้กล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าไม่เกิดการเกาะกลุ่มขนาดใหญ่ของเคลย์ แสดงว่าเคลย์สามารถกระจายตัวได้ในพอลิโพรพิลีนเมื่อใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม ต่อมาจึงได้มีการศึกษาถึงผลของปริมาณหมู่มาเลอิกในพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อการกระจายตัวและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต [35] โดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณหมู่มาเลอิก 0.1 และ 1% โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณหมู่มาเลอิกสูงกว่าจะช่วยให้เกิดความเข้ากันได้ดีกว่า เนื่องจากหมู่มาเลอิกจะเกิดปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้วของมอนต์มอริลโลไนต์ นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณหมู่มาเลอิกสูงกว่าจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่เข้าไประหว่างเฟสได้ง่ายกว่าและเกิดโครงสร้างที่เป็น intercalate และเมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่านาโนคอมพอสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณหมู่มาเลอิกสูงจะมีค่ามอดุลัส ความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกสูงกว่านาโนคอมพอสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีปริมาณหมู่มาเลอิกต่ำ

ต่อมามีงานวิจัยที่ศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [36] พบว่าเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ลงในพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะทำให้นาโนคอมพอสิตที่ได้มีโครงสร้างแบบแทรกสอด แต่สมบัติเชิงกลด้อยลงเนื่องจากมีแรงยึดระหว่างเฟสต่ำ ดังนั้นจึงปรับปรุงโดยใช้พอลิโพรพิลีน



กราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสมซึ่งทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดอนุภาคเล็กลงและช่วยให้การยี้ดระหว่างเฟสดีขึ้น ส่งผลให้นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การทดลอง

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยกำหนดไว้ 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) ค้นคว้าเอกสารงานวิจัย ข้อมูลพื้นฐาน และมาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้องจากแหล่งต่างๆ อาทิเช่น วารสารเชิงวิชาการทั้งในและต่างประเทศ หนังสือและตำรา รวมทั้งการสืบค้นข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต

2) วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและวิธีการทดลอง

3) จัดเตรียมวัสดุุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

4) ดำเนินการวิจัยโดยการเตรียมเม็ดพลาสติกผสม ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

5) นำผลที่ได้จากการวิจัยมาวิเคราะห์ สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

โครงการวิจัยนี้ใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2550 ถึง วันที่ 1 เมษายน พ.ศ.2552 โดยมีแผนการดำเนินงานแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

เดือน ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	_____																	
2		_____																
3			_____															
4						_____												
5													_____					

### 3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Irogran A85G4819) จากบริษัทเอเบิลวัน เอ็นจีเนียริง จำกัด โดยมีสมบัติต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Irogran A85G4819)

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	Irogran A85G4819
ดัชนีการไหล (195°C / 8.7 kg, cm <sup>3</sup> /10 นาที)	-	10 - 50
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	-	740
ความแข็ง (shore A)	ISO 868	85
ความแข็ง (shore D)	ISO 868	37
ความทนแรงดึง (MPa)	ISO 37	28
การยืดตัวสูงสุด (%)	ISO 37	500
มอดุลัสที่การยืดตัว 100% (MPa)	ISO 37	6
มอดุลัสที่การยืดตัว 300% (MPa)	ISO 37	10
ความทนแรงฉีกขาด (N/mm)	ISO 34B	90
ความต้านทานการขีดถู (mm <sup>3</sup> )	ISO 4649	35
ความถ่วงจำเพาะ	ISO 2781	1.22

2. เม็ดพอลิโพรพิลีน (Moplen, HP400K) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเอช เอ็ม ซี พอลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymer) โดยมีสมบัติต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของพอลิโพรพิลีน (HP400K)

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	HP400K
ดัชนีการไหล (230°C / 2.16 kg, กรัม/10 นาที)	ASTM D1238	4
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D792B	0.90
ความทนแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	ASTM D638	33
การยืดตัว ณ จุดคราก (%)	ASTM D638	11
มอดุลัสตัดโค้ง (MPa)	ASTM D790A	1400
ความทนแรงกระแทก (J/m)	ASTM D256A	32
จุดอ่อนตัว (455 kPa, °C)	ASTM D648	93

3. พอลิโพรพิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond MZ203D) จากบริษัทเคมีคัล อินโนเวชัน (Chemical Innovation) โดยมีสมบัติต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของพอลิโพรพิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond MZ203D)

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	Fusabond MZ203D
ดัชนีการไหล (190°C / 2.16 kg, กรัม/10 นาที)	ASTM D1238	102
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D792	0.94
จุดหลอมเหลว (°C)	ASTM D3418	160

4. โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium Montmorillonite) ได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ออกตะเดซิลเอมีน (Octadecylamine, C<sub>18</sub>H<sub>39</sub>N) จากบริษัทเคมีคัลเอ็กซ์เพรส (Chemical Express) โดยมีสมบัติต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของออกตะเดซิลเอมีน

สมบัติ	ออกตะเดซิลเอมีน
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.86
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	269.52
จุดหลอมเหลว (°C)	50 - 52
จุดเดือด (°C)	349
จุดวาบไฟ (°C)	110

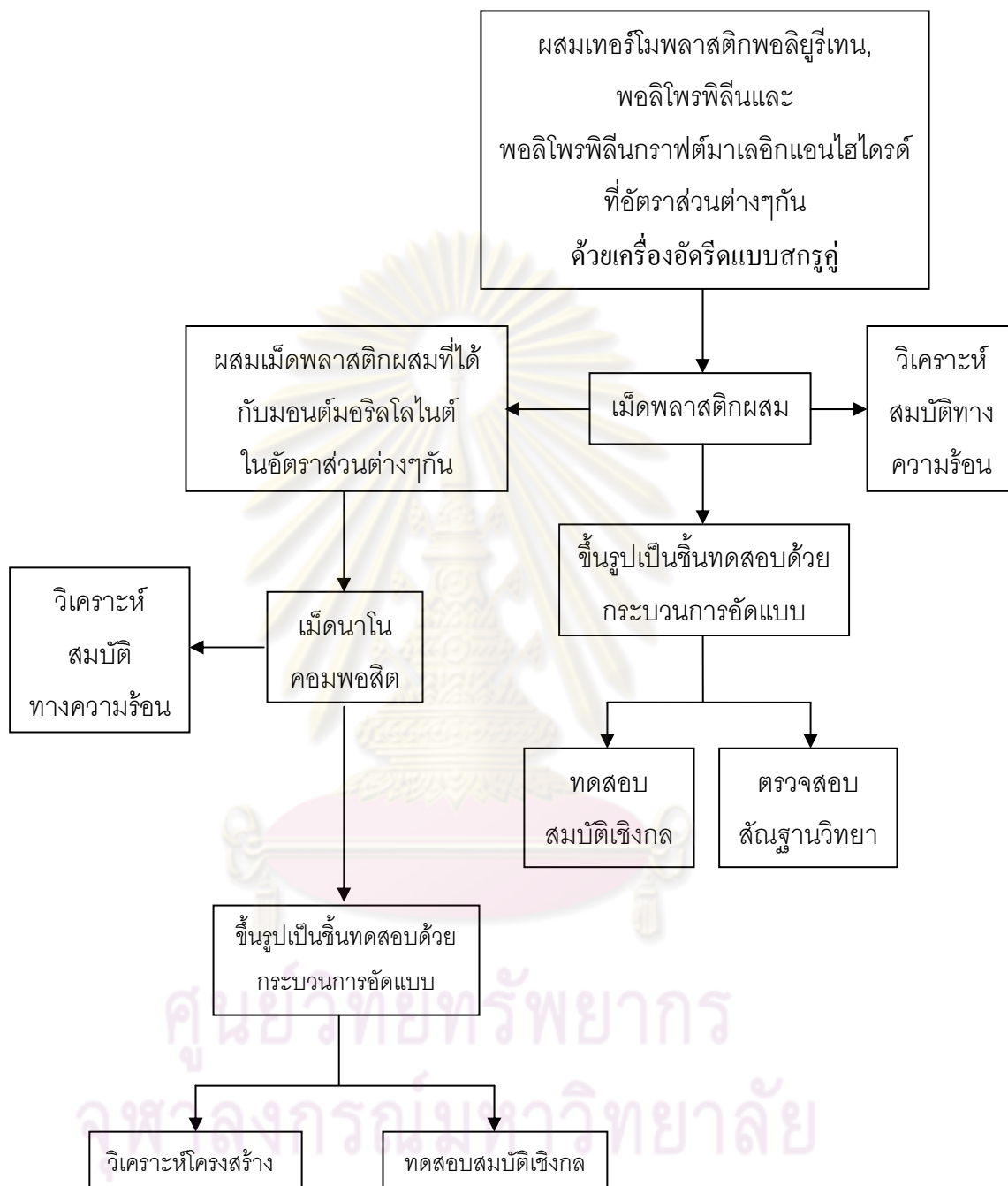
### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Heater
2. กรวยกรองแบบสุญญากาศ
3. ตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช (mesh)
4. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (brabender technologie, Thermo PRISM, Germany)
5. เครื่องอัดแบบ (LabTech Engineering company, Ltd.)

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องทดสอบสมบัติอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น LLOYD LR100K
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction, XRD) รุ่น D8 Discover
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM 6400 (JEOL, Tokyo, Japan)
4. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) รุ่น METTLER DSC822
5. เครื่องเทอร์โมแกรวิเมทริกแอนนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851°
6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) รุ่น METTLER TOLEDO DMA861°

## 3.5 ขอบเขตการทดลอง



### 3.6 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

1. ละลายออกตะเดซิลเอมีน 1 กรัมในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 1 มิลลิลิตรลงในสารละลายให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) เป็นเวลา 20 นาที (จนกระทั่งออกตะเดซิลเอมีนละลายหมด)
2. ละลายโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ 2.5 กรัม ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) เป็นเวลา 20 นาที (จนกระทั่งมอนต์มอริลโลไนต์กระจายตัว)
3. เทสารละลายที่ได้จาก 1. ลงใน 2.
4. นำของผสมที่ได้ไปปั่นด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง โดยใช้ความเร็วประมาณ 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 เครื่องปั่นความเร็วสูง

5. กรองของผสมที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ และล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนไม่มีคลอไรด์ไอออนหลงเหลืออยู่ (ทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต)
6. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช

7. นำผงมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ร่อนได้ไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ผงมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

### 3.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน

1. ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีนโดยเติมและไม่เติมสารช่วยผสม (PP-g-MA) ที่อัตราส่วนต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปดังนี้ 185 183 178 175 และ 165°C ความเร็วสกรูเท่ากับ 185 รอบ/นาที

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) (% โดยน้ำหนัก)	พอลิโพรพิลีน (PP) (% โดยน้ำหนัก)	พอลิโพรพิลีนกราฟท์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) (phr)
90	10	0, 3, 5, 10
80	20	0, 3, 5, 10
70	30	0, 3, 5, 10
60	40	0, 3, 5, 10
50	50	0, 3, 5, 10

2. นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาตัดเป็นเม็ด





รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดสกรูคู่

### 3.8 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

1. ผสมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนที่เต็มและไม่เต็มสารช่วยผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปดังนี้ 185 183 178 175 และ 165°C ความเร็วสกรูเท่ากับ 185 รอบ/นาที

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนของนาโนคอมพอสิต

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) (% โดยน้ำหนัก)	พอลิโพรพิลีน (PP) (% โดย น้ำหนัก)	พอลิโพรพิลีน กราฟท์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) (phr)	มอนต์มอริลโลไนต์ (phr)
90	10	0, 5	1, 3
80	20	0, 5	1, 3

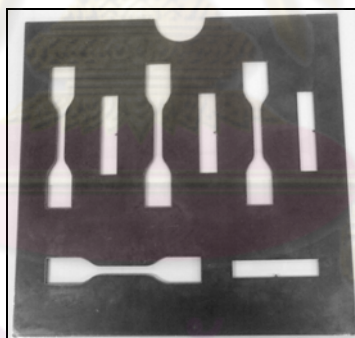
2. นำนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มาตัดเป็นเม็ด

### 3.9 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดแบบที่อุณหภูมิ 180°C



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดแบบ



รูปที่ 3.5 แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูป

### 3.10 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยอัลคิตเอมีน และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรภายในนาโนคอมพอสิต สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร และนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน รุ่น D8 Discover โดยทำการวิเคราะห์ที่  $2\theta$  เท่ากับ 1 ถึง 10 และผลการวิเคราะห์แสดงเป็นกราฟ



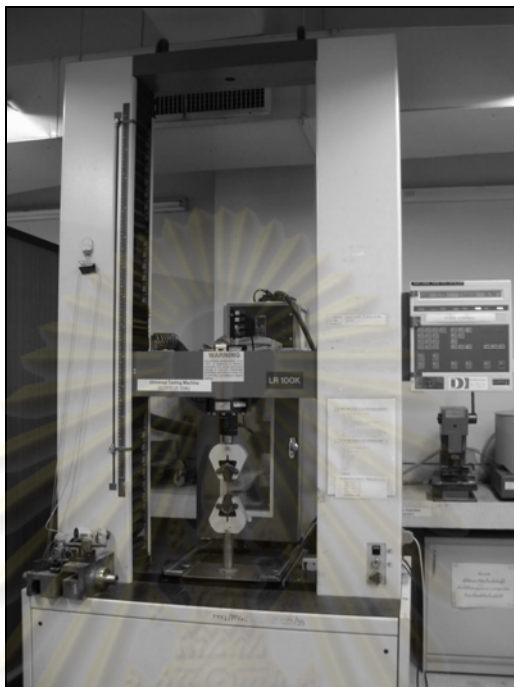
รูปที่ 3.6 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction รุ่น D8 Discover)

### 3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล

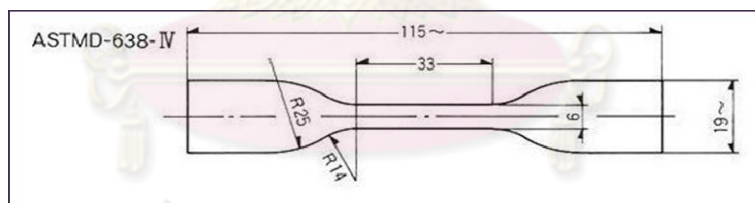
#### 3.11.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง (universal testing machine, LLOYD รุ่น LR 100K) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะเวลา

ยาวเกจ (gauge length) 50 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างที่หนีบ 115 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบมีขนาดคล้ายรูปดัมเบล ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (universal testing machine, LLOYD รุ่น LR 100K)



รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง

### 3.11.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและวัสดุนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, METTLER TOLEDO รุ่น DMA861<sup>o</sup>) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 โดยใช้โหมดแรงเฉือน (shear mode) ชิ้นทดสอบมีขนาด 5x5x1 มิลลิเมตร โดยใช้สภาวะการ

วิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  อัตราการเพิ่มความร้อน  $3^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที เพื่อศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, METTLER TOLEDO รุ่น DMA861<sup>o</sup>)

### 3.12 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

#### 3.12.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและวัสดุนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, METTLER รุ่น DSC 822) ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 โดยใช้สภาวะการวิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $250^{\circ}\text{C}$  อัตราการเพิ่มความร้อน  $20^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิเมอร์ผสมและวัสดุนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 3.10 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, METTLER รุ่น DSC 822)

### 3.12.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและวัสดุนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851<sup>o</sup>) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 นำพอลิเมอร์ผสมน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุชชีเบิลอะลูมินา โดยใช้สภาวะการวิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ 25<sup>o</sup>C ถึง 1000<sup>o</sup>C อัตราการเพิ่มความร้อน 20<sup>o</sup>C ต่อนาที ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัว ( $T_d$ ) ของพอลิเมอร์ผสมและวัสดุนาโนคอมพอสิต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851°)

### 3.13 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, รุ่น JSM 6400) แสดงในรูปที่ 3.12 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นการศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาบริเวณรอยหักของชิ้นทดสอบ ซึ่งจะต้องทำการเคลือบทองลงบนพื้นผิวที่ต้องการทำการตรวจสอบ โดยใช้กำลังขยายในการตรวจสอบคือ 500 เท่า และ 1500 เท่า



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JEOL รุ่น JSM 6400)

## บทที่ 4

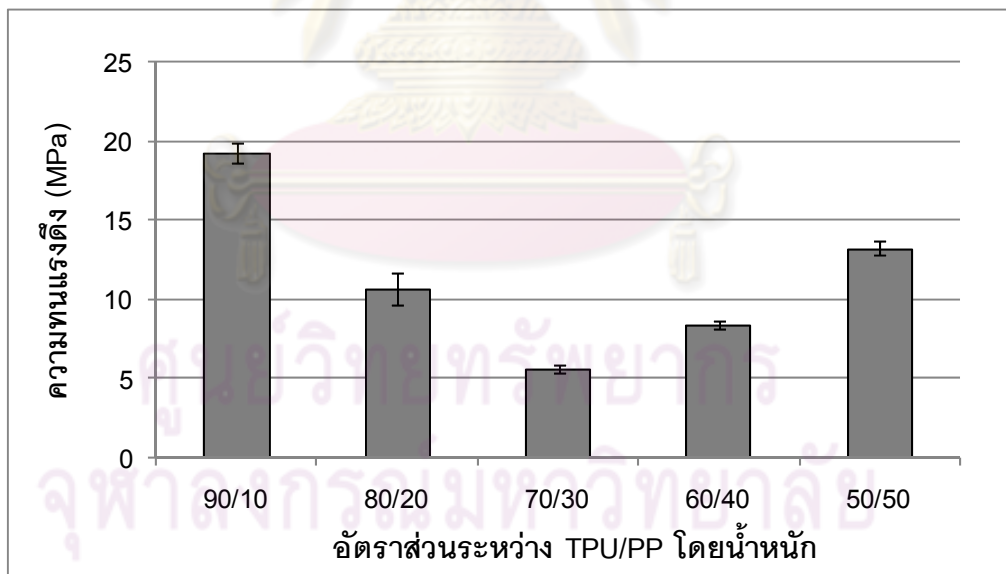
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 ผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้ สมบัติด้านแรงดึง สมบัติทางความร้อน และ สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีดและขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ โดยในระบบของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (ทีพียู) และพอลิโพรพิลีน (พีพี)

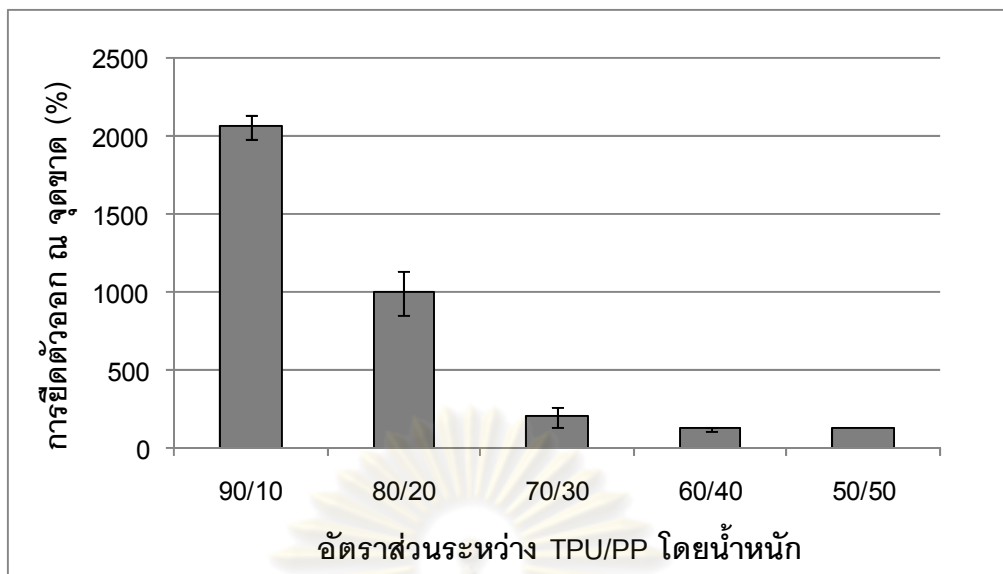
##### 4.1.1 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่า Young's Modulus

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพีพีที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาดและค่า Young's Modulus แสดงไว้ในรูปที่ 4.1-4.3

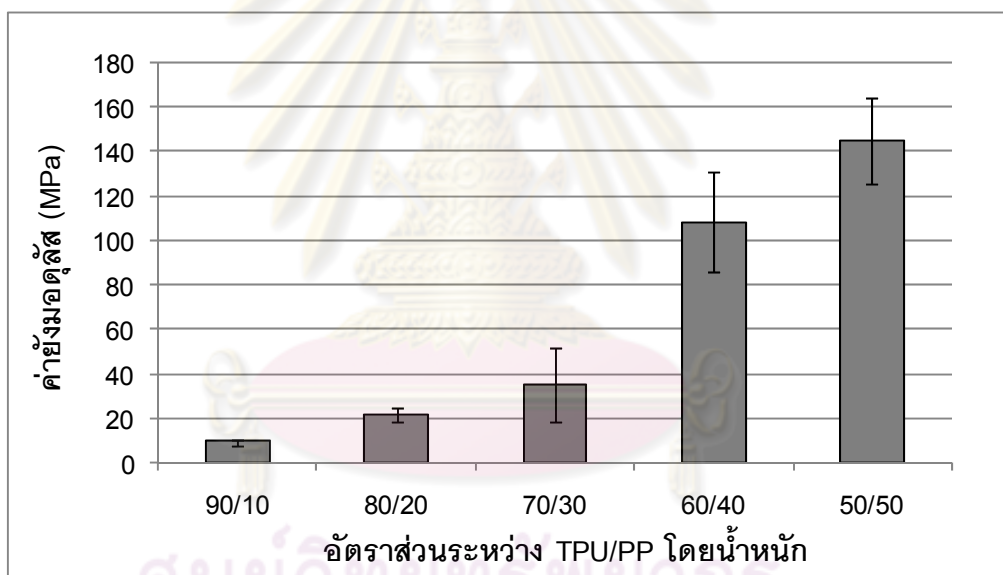


รูปที่ 4.1 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ





รูปที่ 4.2 การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.3 ค่ายังมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

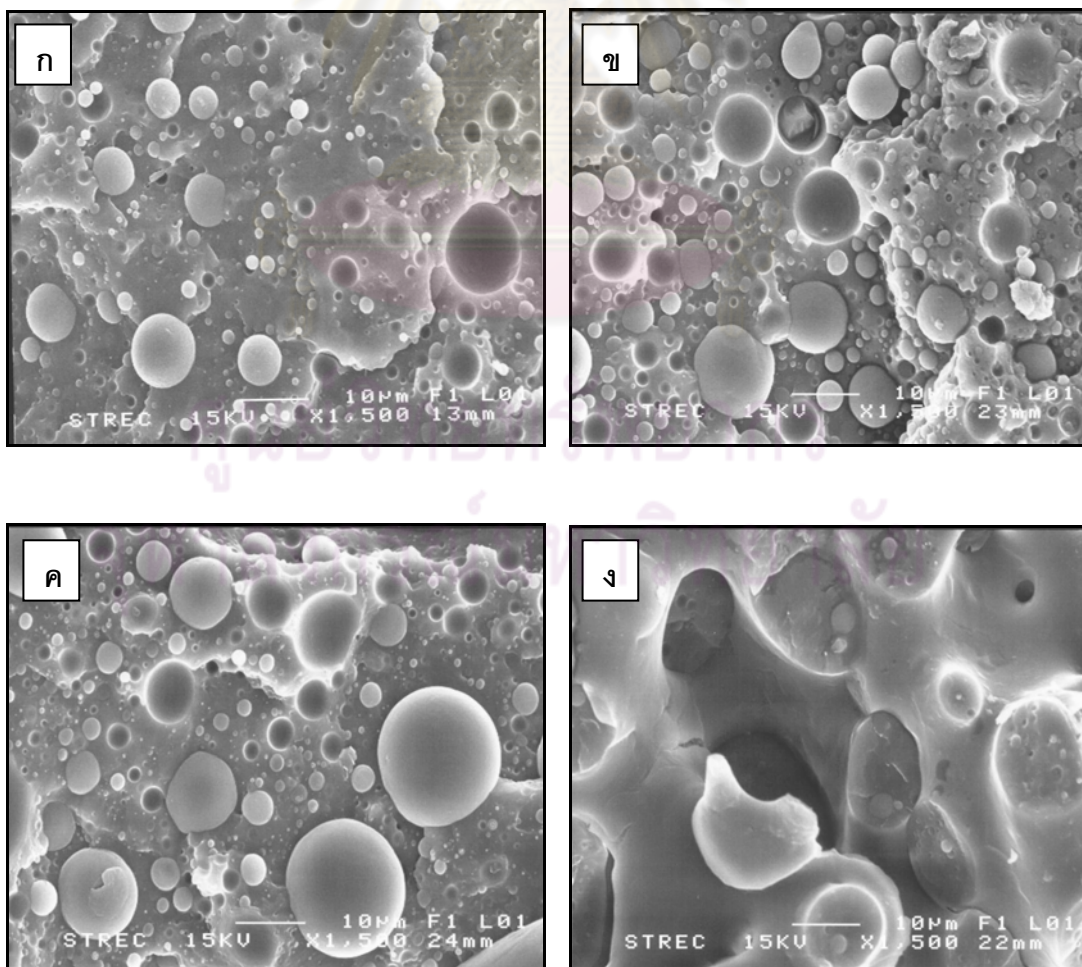
จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณพีพีในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยเกิดจากทีพียูและพีพีมีพลังงานอิสระที่ผิวและมีความมีขั้วที่แตกต่างกัน [30,37] ค่าความทนแรงดึงต่ำสุดพบที่อัตราส่วนของทีพียู/พีพีเป็น 70/30 โดยที่อัตราส่วนของทีพียู/พีพีเป็น 90/10 80/20 และ 70/30 ทีพียูจะทำหน้าที่เป็นเฟสหลักและพีพีทำหน้าที่เป็นดิสเพอร์สเฟส แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพีพีเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พีพีซึ่งทำหน้าที่เป็นดิสเพอร์สเฟสจะเกิดการรวมกลุ่มกันมีขนาดใหญ่

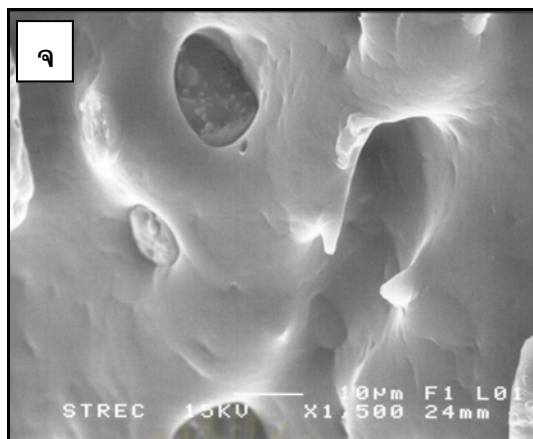
ขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นเฟสหลัก จึงเกิดการกลับเฟส (phase inversion) ขึ้น [38] ทำให้ค่าความทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากพีพีเปลี่ยนมาเป็นเฟสหลักแทนทีฟิยู

จากการเพิ่มปริมาณพีพีในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ส่งผลให้การยึดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 4.2 และค่ายังมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากพีพีเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งตึง (stiffness) สูงและยึดตัวได้น้อย ดังนั้นเมื่อผสมกับทีฟิยูซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถยึดตัวได้มาก พีพีจึงเข้าไปขัดขวางการยึดตัวของทีฟิยูทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีการยึดตัวออก ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้พีพียังทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งมากยิ่งขึ้นด้วย [39]

#### 4.1.2 สัณฐานวิทยา

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่อสัณฐานวิทยา แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 โดยมีกำลังขยาย 1500 เท่า





รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ TPU/PP เป็นดังนี้

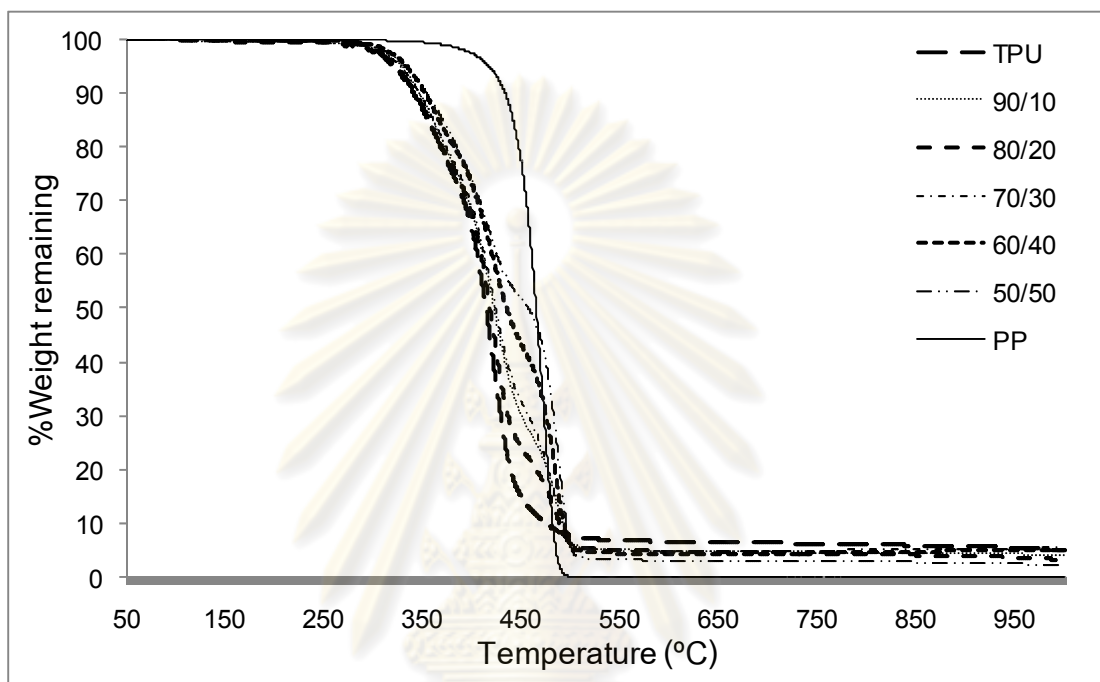
(ก) 90/10 (ข) 80/20 (ค) 70/30 (ง) 60/40 และ (จ) 50/50

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่า พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและมีการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก), (ข) และ (ค) โดยจะเห็นลักษณะของอนุภาคพีพีที่มีทรงกลมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของทีฟิยูและผิวของอนุภาคพีพีมีความเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดกันต่ำระหว่างผิวของสองเฟส [40,41] จากรูปที่ 4.4 (ง) และ (จ) จะเห็นลักษณะสัณฐานวิทยาที่แตกต่างออกไปเนื่องจากเกิดการกลับเฟส โดยปริมาณพีพีที่เพิ่มมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นเฟสหลักแทนทีฟิยู ซึ่งสอดคล้องกับผลความทนแรงดึงที่ได้ แต่ทั้งสองเฟสยังคงความไม่เข้ากันอยู่ ซึ่งความไม่เข้ากันของทีฟิยูและพีพีเกิดจากความมีขั้วที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างความตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสของสองเฟสสูง (high interfacial tension)

#### 4.1.3 อุณหภูมิการสลายตัว

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมเมื่อเทียบกับอุณหภูมิด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิสตั้งแต่อุณหภูมิ 50 - 1000°C ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าทีฟิยูมีช่วงของอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวค่อนข้างกว้าง ซึ่งเป็นลักษณะของโคพอลิเมอร์ (copolymer) โดยมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 320°C ซึ่งต่ำกว่าพีพี แต่มีอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวสูงกว่าพีพี ส่วนพีพีจะแสดงลักษณะของโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) คือมีช่วง

อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวแคบกว่าคือมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวใกล้เคียงกัน โดยพีพีมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 435°C และพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ใกล้เคียงกับ พีพีและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวที่ใกล้เคียงกับพีพี [1]



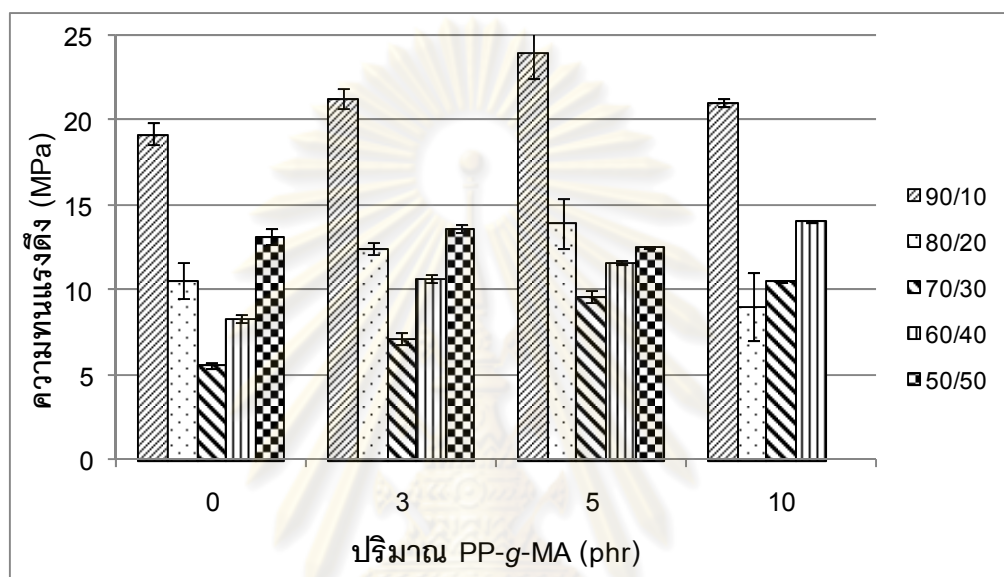
รูปที่ 4.5 TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.2 ผลของปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

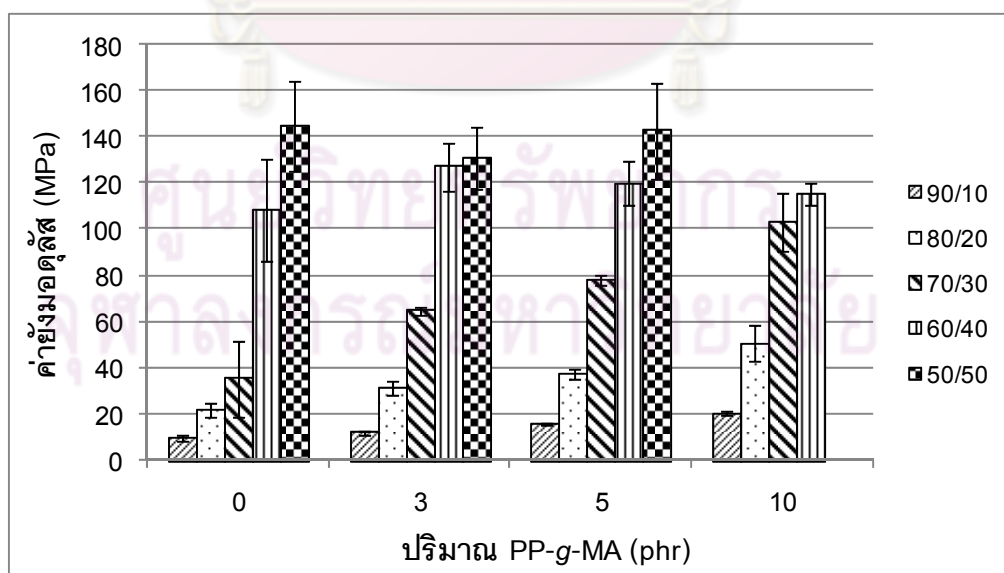
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (polypropylene graft maleic anhydride, PP-g-MA) ในพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ สมบัติด้านแรงดึง สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา โดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมผสมกับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ โดยในระบบของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยพีพีและพีพีที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 3-10 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.6 แต่พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 50 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้เมื่อใส่สารช่วยผสมปริมาณ 10 phr

#### 4.2.1 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง

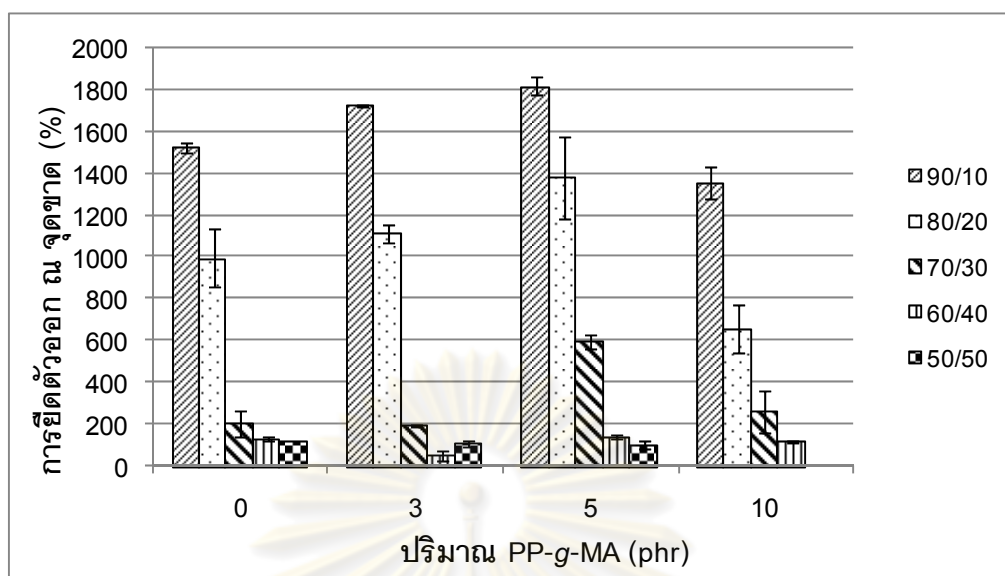
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆกับความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาดและค่ามอดุลัส แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 - 4.8



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมกับสารช่วยผสมที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมกับสารช่วยผสมที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมกับสารช่วยผสมที่ปริมาณต่างๆ

จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างที่พียูกับพีพีช่วยให้มีความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยข้างหนึ่งจับกับที่พียูและอีกข้างหนึ่งจับกับพีพีและช่วยในการกระจายตัวของพีพีในพอลิเมอร์ผสมด้วย นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของสารช่วยผสมยังสร้างแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟสอย่างหลวมๆ [8] โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 5 phr มีค่าความทนแรงดึงสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็น 10 phr พบว่าทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง เนื่องจากสำหรับแต่ละอัตราส่วนของการผสมพอลิเมอร์ จะมีปริมาณสารช่วยผสมที่มากที่สุดที่จะสามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ แต่เมื่อปริมาณสารช่วยผสมมากกว่าปริมาณดังกล่าวจะไม่ส่งผลให้ความเข้ากันได้เพิ่มขึ้นอีก [1] ซึ่งค่าความทนแรงดึงที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์นั้นสามารถพบได้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆด้วย [31]

เมื่อพิจารณาการยึดตัวที่จุดขาดของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าการใส่สารช่วยผสมจะทำให้การยึดตัวที่จุดขาดสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของการยึดตัว ณ จุดขาดนี้แสดงถึงความเข้ากันได้มากขึ้นเนื่องมาจากการใช้สารช่วยผสม ยกเว้นพอลิเมอร์ผสมที่มีพีพีเป็นส่วนประกอบร้อยละ

40 และ 50 และพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 10 phr เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าวพีพีจะมีปริมาณมากจนสามารถรวมตัวกันเป็นเฟสหลัก ทำให้พอลิเมอร์ผสมแสดงสมบัติของพีพีออกมาอย่างเด่นชัด คือมีการยึดตัวที่จุดขาดต่ำ

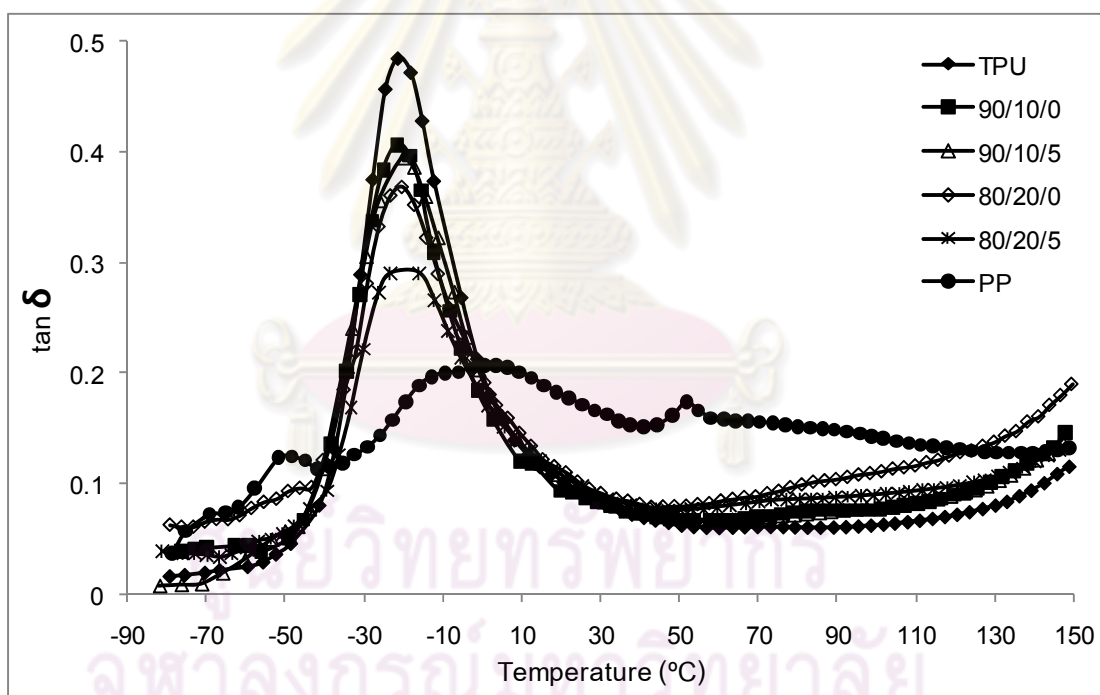
ปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมจะแปรผันตรงกับค่า Young's modulus ดังแสดงในรูปที่ 4.8 กล่าวคือเมื่อปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้น ค่า modulus มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยให้ความเข้ากันได้ระหว่างพีพีกับทีฟียูเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชั้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

#### 4.2.2 สมบัติเชิงกลพลวัต

ทำการวิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมที่มีพีพีร้อยละ 10 และ 20 ที่ใช้สารช่วยผสมปริมาณ 5 phr และที่ไม่ใช้สารช่วยผสม ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, DMA) เพื่อศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ได้กราฟ  $\tan \delta$  ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าทีฟียูมีจุดสูงสุดของกราฟที่อุณหภูมิ  $-21.35^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของส่วนนิมในทีฟียู และพีพีแสดงช่วงการเปลี่ยนแปลง 3 ช่วง ได้แก่ที่อุณหภูมิ  $-51.6^\circ\text{C}$   $3.35^\circ\text{C}$  และ  $51.65^\circ\text{C}$  ซึ่งที่อุณหภูมิ  $-51.6^\circ\text{C}$  เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบแกมมาของพีพีซึ่งเป็นการเคลื่อนไหวของหมู่เล็กๆ พวกเมทิลและเมทิลีน ช่วงอุณหภูมิ  $-20^\circ\text{C}$  ถึง  $30^\circ\text{C}$  เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเบตาของส่วนอดัณฐานในพีพี และที่อุณหภูมิ  $51.65^\circ\text{C}$  เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบแอลฟาซึ่งเป็นการเคลื่อนไหวของสายโซ่ที่มีความแข็งในพีพี [42] เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของพอลิเมอร์ผสมจะพบว่า พอลิเมอร์ผสมจะแสดงกราฟที่มีลักษณะคล้ายที่ฟียูคือมีพีคเดียวที่ประมาณ  $-21^\circ\text{C}$  ถึง  $-16^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของทีฟียู [31] แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพีพีในกราฟของพอลิเมอร์ผสม อาจเนื่องจากปริมาณพีพีที่ใส่น้อยและเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน นอกจากนี้พบว่าเมื่อใส่สารช่วยผสมจะทำให้จุดสูงสุดของกราฟซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นและความสูงของกราฟ (amplitude) มีค่าลดลง เนื่องจากมีการยึดติดที่ดีขึ้นระหว่างสองเฟส [31,36] โดยจุดสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จุดสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  ของพอลิเมอร์ผสม

TPU/PP/PP-g-MA	จุดสูงสุดของกราฟ $\tan \delta$		
TPU	-21.4		
PP	-51.6	3.4	51.7
90/10/0	-21.8		
90/10/5	-20.2		
80/20/0	-20.4		
80/20/5	-16.1		

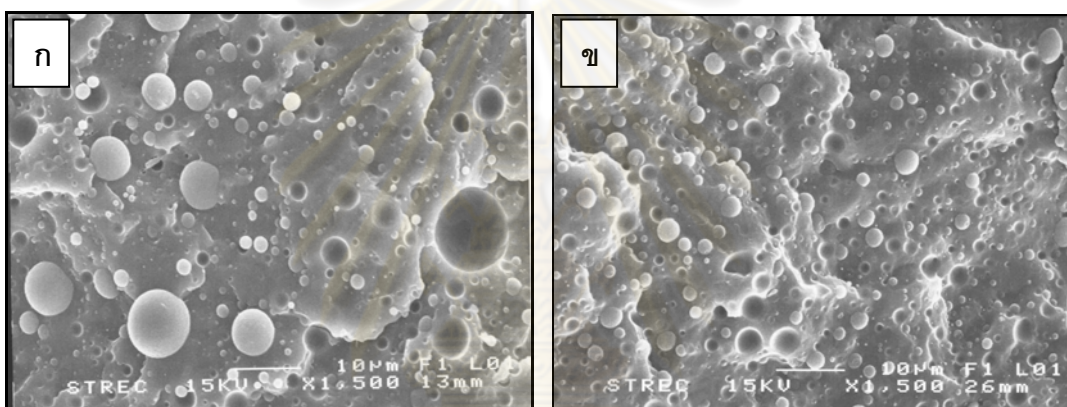


รูปที่ 4.9 กราฟ  $\tan \delta$  ของ TPU, PP และพอลิเมอร์ผสม TPU/PP/PP-g-MA



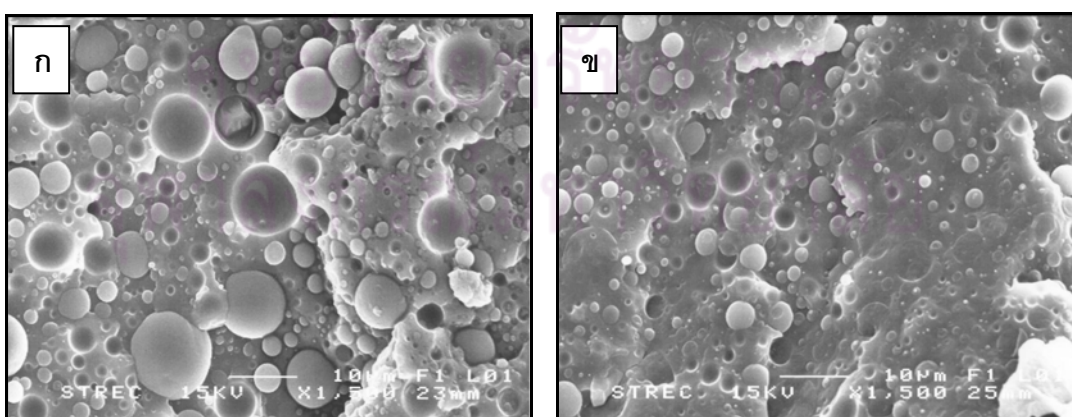
### 4.2.3 สัณฐานวิทยา

พอลิเมอร์ผสมที่มีพีพีเป็นส่วนประกอบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาวิเคราะห์ สัณฐานวิทยาที่ผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่ กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้นเมื่อใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม โดยอนุภาคของพีพีที่กระจายตัวอยู่มีขนาดเล็กกลงและมีการ กระจายตัวที่ดีขึ้น [31,38] ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความ ทนแรงดึงที่ได้



รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ TPU/PP เป็น 90/10

(ก) ไม่ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA (ข) ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 5 phr



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ TPU/PP เป็น 80/20

(ก) ไม่ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA (ข) ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 5 phr

#### 4.2.4 อุณหภูมิการสลายตัว

เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่ากับ 0, 3, 5 และ 10 phr มาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิสตั้งแต่อุณหภูมิ 50 - 1000 °C เพื่อหาอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวแสดงในตารางที่ 4.2

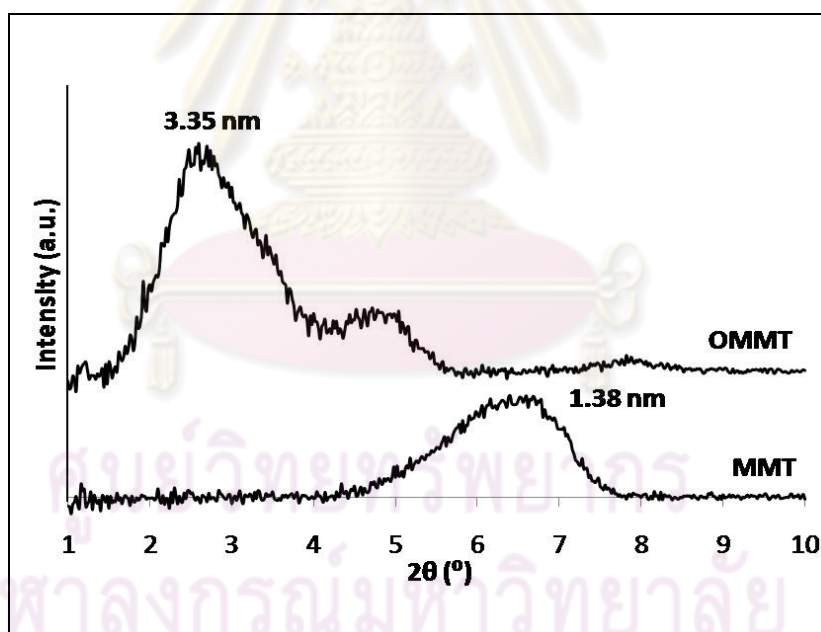
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมีปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 0 3 5 และ 10 phr

ปริมาณ PP-g-MA (phr) TPU/PP	0	3	5	10
90/10	323.3	328.3	326.1	325.1
80/20	318.0	324.4	324.3	323.2
70/30	325.4	325.8	322.9	322.9
60/40	327.7	316.7	321.1	318.0
50/50	333.1	317.8	318.9	-

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ทุกอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 317 - 333°C และไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมไม่ทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างที่พียูและพีพีลดลง

### 4.3 ผลของการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์

ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร (Organomodified montmorillonite, OMMT) ด้วยออกตะเดซิลเอมีน โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดช่องว่างหรือแกลดริระหว่างชั้นของแผ่นอะลูมิเนียมซิลิเกต (d-spacing) เปรียบเทียบกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Montmorillonite, MMT) ซึ่งคำนวณจากองศาการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยทำการวัดที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $1-10^\circ$  พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะปรากฏพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $6.4$  [34] และระยะห่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 1.38 นาโนเมตร ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรจะปรากฏพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $2.6$  [34] และระยะห่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 3.35 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบแพทเทิร์นพีคของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร (OMMT)

จากการที่ดัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีนแล้วทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตสูงขึ้น เนื่องจากอัลคิลเอมีนที่เข้าไปแทรกสอดระหว่างชั้นของเคลย์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนแคตไอออนระหว่างอัลคิลแอมโมเนียมไอออนและโซเดียม

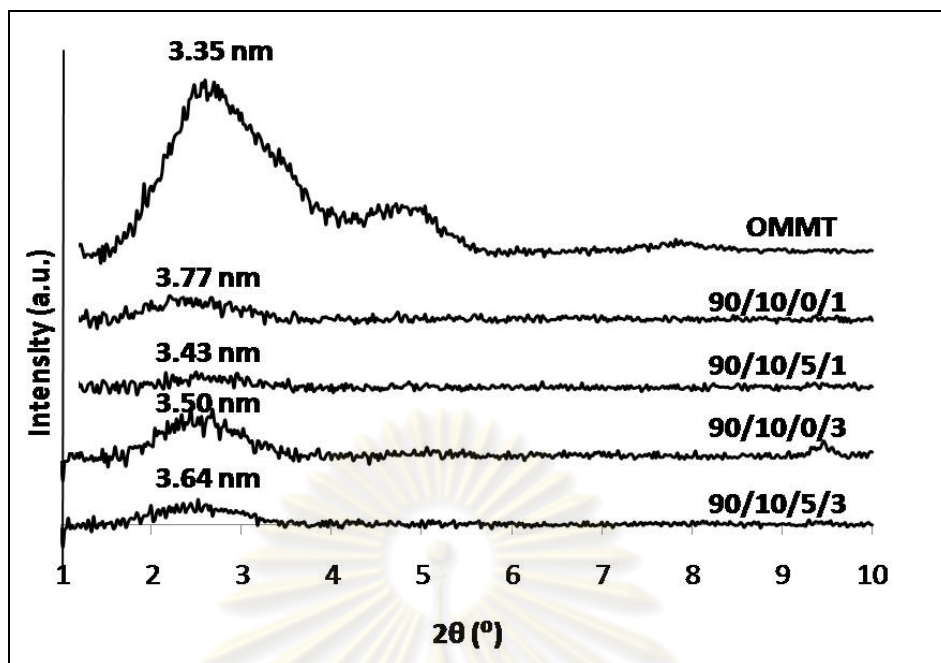
ไอออน จะมีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลกับค่าขนาดช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ความหนาแน่นของประจุ อัตราการแลกเปลี่ยนประจุ และความยาวของสายโซ่อัลคิลเอมีนที่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ [10]

#### 4.4 ผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์

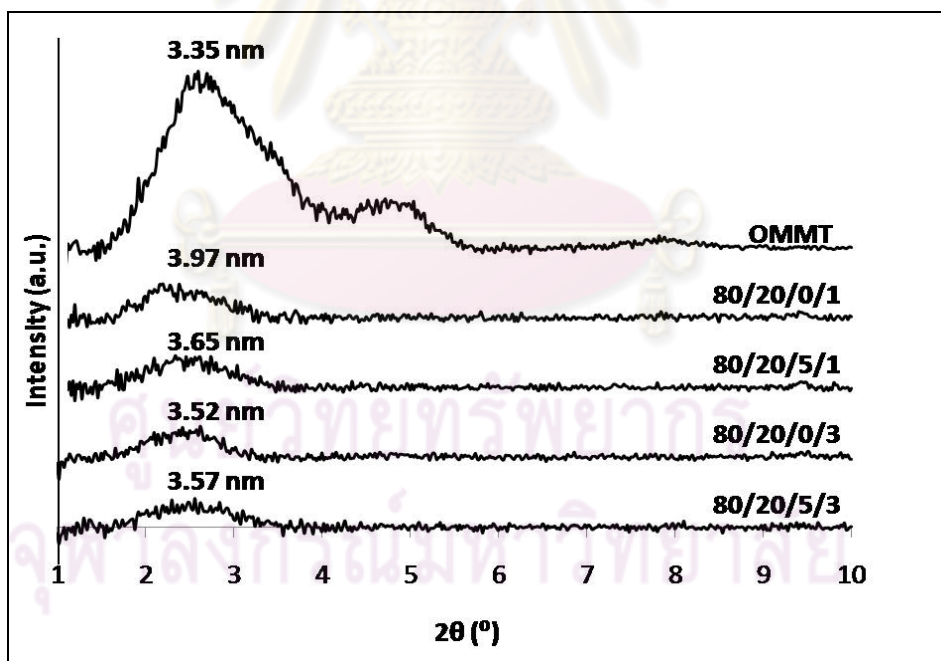
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ในนาโนคอมพอสิตที่มีต่อสมบัติต่างๆ โดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม แล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ โดยในระบบของนาโนคอมพอสิตประกอบด้วยทีฟลูและพีพีที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 โดยน้ำหนักโดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr เป็นสารช่วยผสม และใช้มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 1 และ 3 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.7

##### 4.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

นาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 และ 3 phr ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรภายในนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน จากรูปที่ 4.13 - 4.14 พบว่านาโนคอมพอสิตที่ทุกอัตราส่วนมีระยะห่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น แสดงว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแทรกสอดเข้าไปในระหว่างชั้นซิลิเกตได้ แต่ชั้นซิลิเกตยังไม่เกิดการแยกออกจากกัน นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จึงยังเป็นโครงสร้างแบบแทรกสอด (intercalated clay nanocomposite) นอกจากนี้ยังพบว่าแพทเทิร์นพีคของนาโนคอมพอสิตมีความเข้มพีค (intensity) ที่ลดลงเมื่อใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr เป็นสารช่วยผสม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีขึ้นของเคลย์ในนาโนคอมพอสิต [43,44]



รูปที่ 4.13 แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของนาโนคอมพอสิตระหว่าง TPU/PP/PP-g-MA/OMMT ที่อัตราส่วน TPU/PP เท่ากับ 90/10

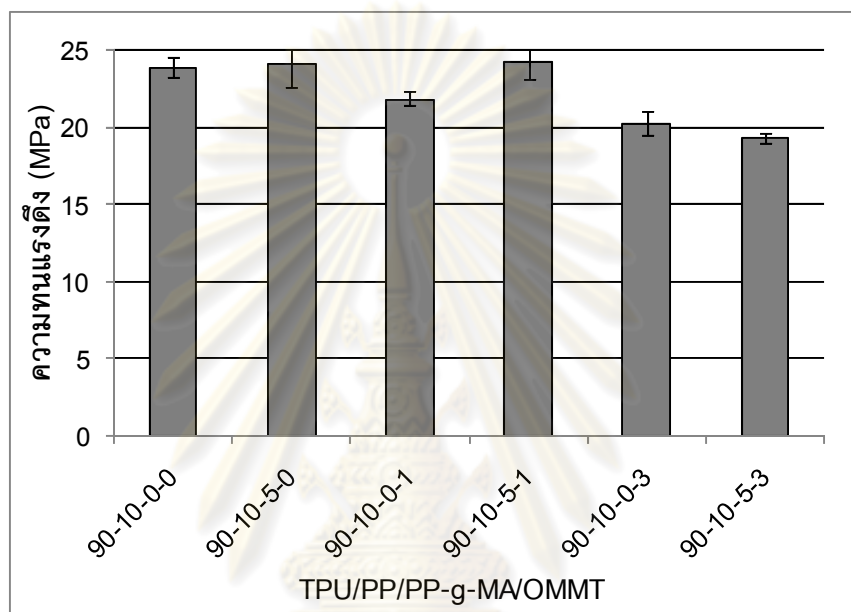


รูปที่ 4.14 แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของนาโนคอมพอสิตระหว่าง TPU/PP/PP-g-MA/OMMT ที่อัตราส่วน TPU/PP เท่ากับ 80/20

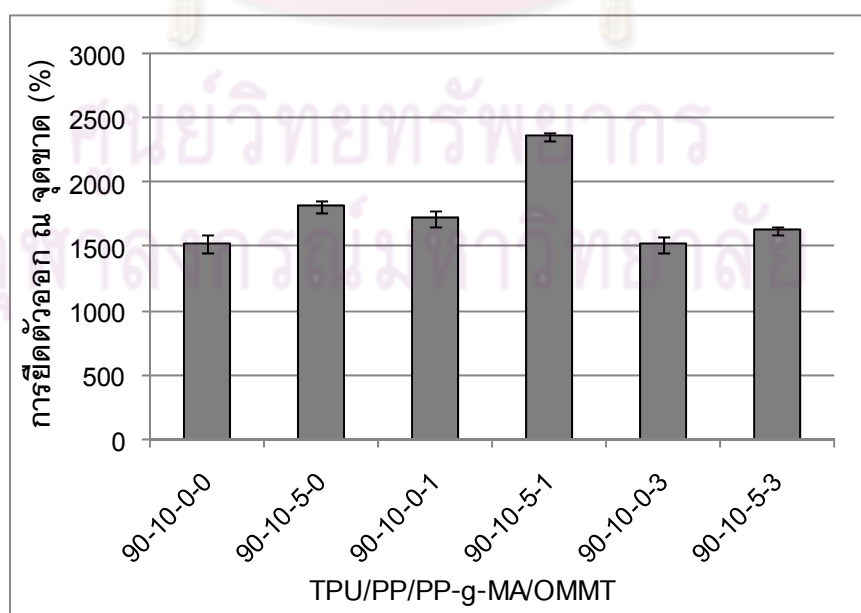
#### 4.4.2 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอนต์มอริลไลไนต์และสารช่วยผสมที่อัตราส่วนต่างๆ กับ ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสของนาโนคอมพอสิต แสดงไว้ในรูปที่

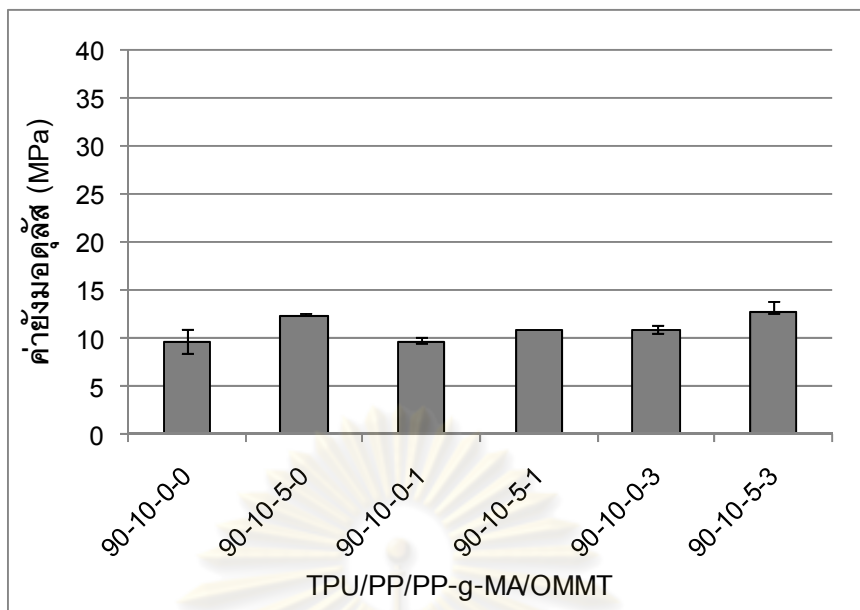
4.15



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิต

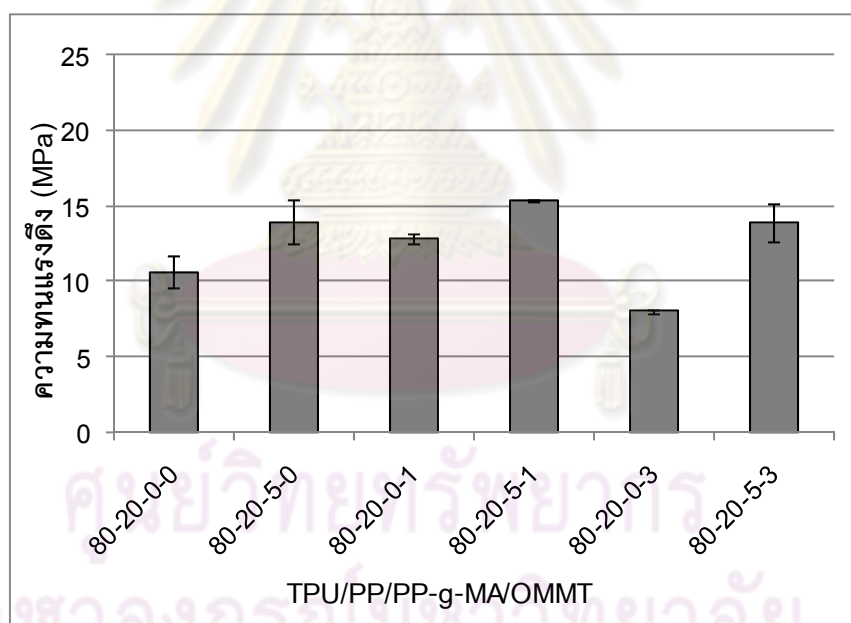
ที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10

(ก) ความทนแรงดึง (ข) การยืดตัวออก ณ จุดขาด (ค) ค่ายังมอดุลัส

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และสารช่วยผสมที่อัตราส่วนต่างๆ กับสมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 10 พบว่าเมื่อใส่เคลย์ปริมาณ 1 phr ลงในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใส่สารช่วยผสมส่งผลให้ความทนแรงดึงและการยืดตัวออก ณ จุดขาดมีค่าลดลงเนื่องจากมีแรงยึดระหว่างผิวสัมผัสของสองเฟสต่ำ แต่เมื่อใส่เคลย์ที่ปริมาณเดียวกันลงในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม พบว่าความทนแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่การยืดตัวออก ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอนุภาคของเคลย์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรสามารถช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสม ซึ่งการยืดตัวออก ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อใส่เคลย์นั้นแสดงให้เห็นว่านาโนคอมพอสิตมีความเหนียว (toughness) มากขึ้น นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ยังทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างที่พียูและพีพี ช่วยให้มี ความเข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น [36,44] สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์เป็น 3 phr จะทำให้ค่าความทนแรงดึงและการยืดตัวออก ณ จุดขาดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของเคลย์ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานขึ้น [33,45]

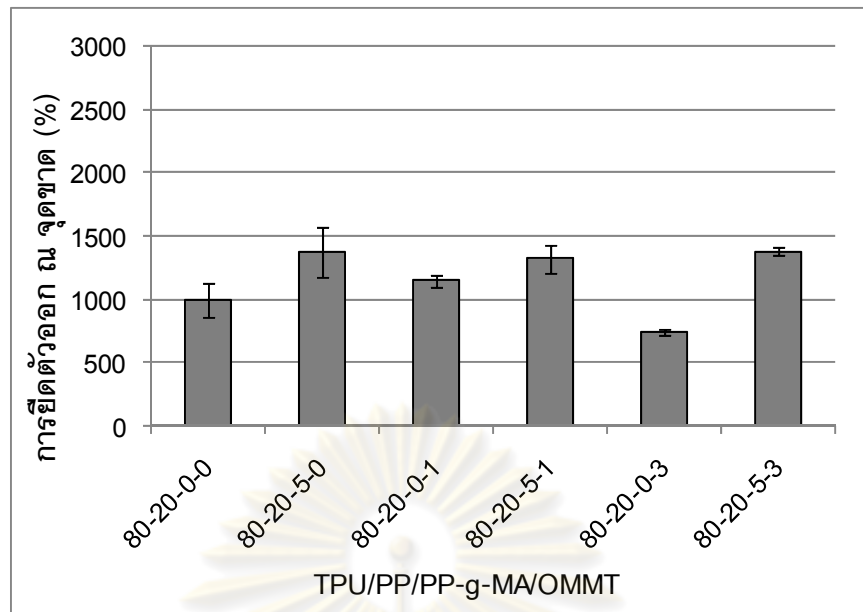
และเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ายังมอดุลัสของนาโนคอมพอสิต พบว่าการใส่เคลย์ไม่ทำให้ค่ายังมอดุลัสเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก อาจเนื่องมาจากปริมาณเคลย์ที่ใส่น้อยมากจนไม่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นทดสอบ

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 20 พบว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยเคลย์ปริมาณ 1 phr โดยใช้สารช่วยผสมมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเคลย์ พบว่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่านาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 20 มีค่าความทนแรงดึงและการยืดตัวออก ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีปริมาณที่พื้น้อยกว่า และมีค่ายังมอดุลัสที่สูงกว่าเนื่องจากมีปริมาณพีพีที่มากกว่านาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.16

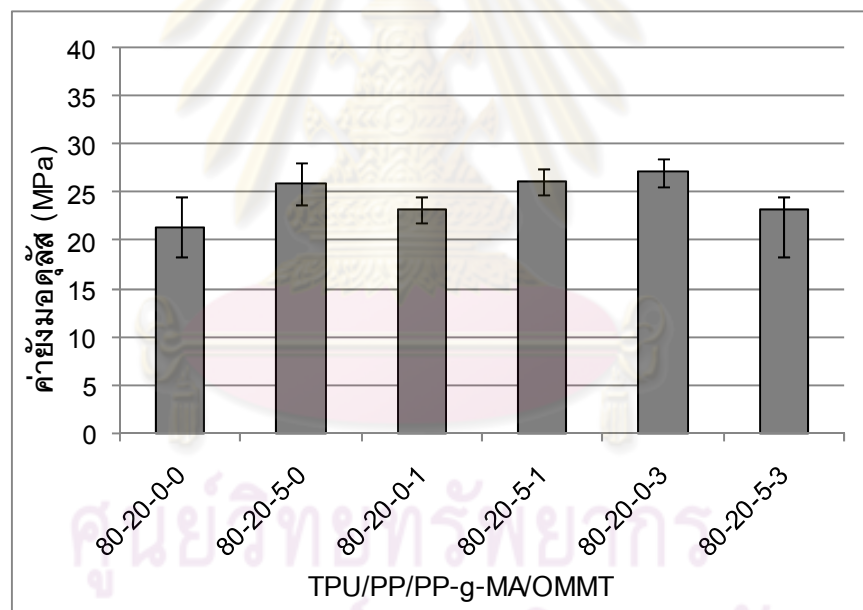


(ก)





(ข)



(ค)

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอลิต

ที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20

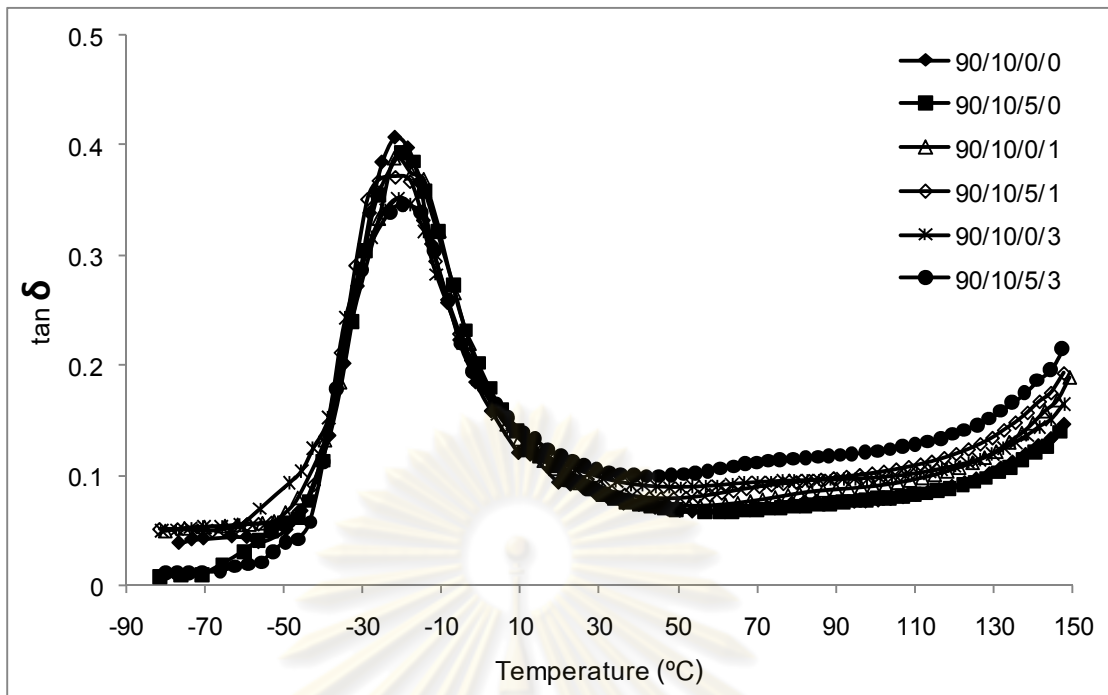
(ก) ความทนแรงดึง (ข) การยืดตัวออก ณ จุดขาด (ค) ค่ายังมอดูลัส

#### 4.4.3 สมบัติเชิงกลพลวัต

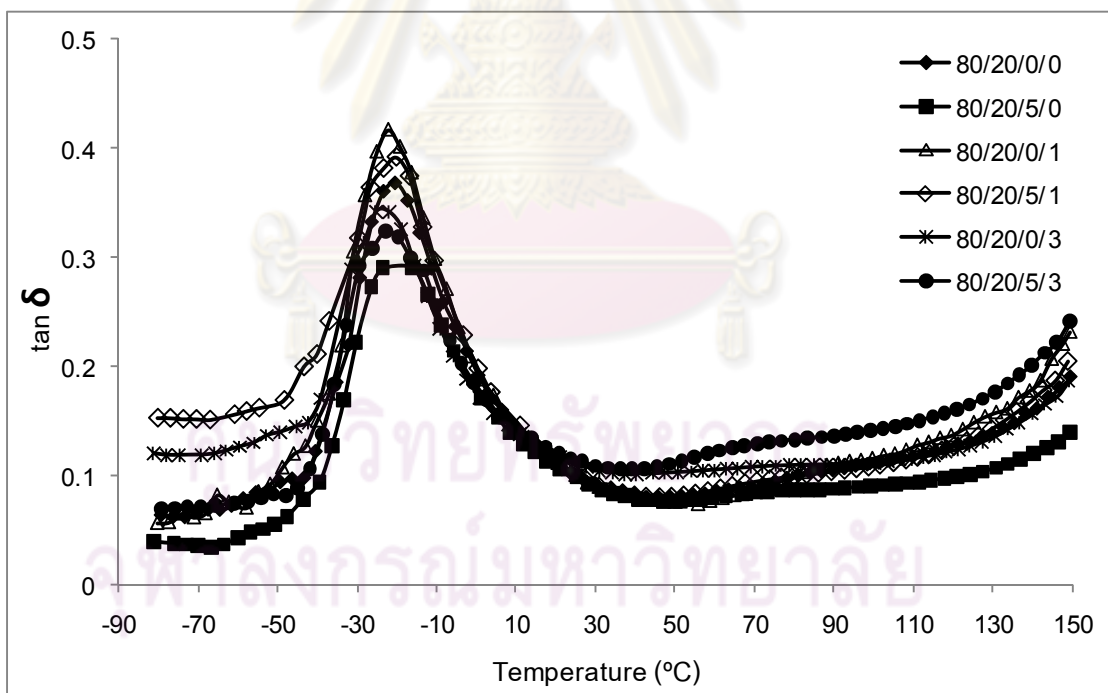
จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของนาโนคอมพอสิตที่มีพีพีปริมาณร้อยละ 10 และ 20 ได้กราฟ  $\tan \delta$  ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าการเติมเคลย์ลงไปในพอลิเมอร์ผสมโดยไม่ใช้สารช่วยผสมจะทำให้จุดสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงมาที่อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากเคลย์เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ [36] แต่เมื่อเติมสารช่วยผสมลงในนาโนคอมพอสิตจะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีค่าสูงขึ้นซึ่งแสดงว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้ากันได้มากขึ้น [44] โดยตำแหน่งจุดสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  ของนาโนคอมพอสิตแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 จุดสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  ของนาโนคอมพอสิต

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	จุดสูงสุดของ กราฟ $\tan \delta$	TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	จุดสูงสุดของ กราฟ $\tan \delta$
90/10/0/0	-21.8	80/20/0/0	-20.4
90/10/5/0	-20.2	80/20/5/0	-16.1
90/10/0/1	-22.1	80/20/0/1	-22.1
90/10/5/1	-21.8	80/20/5/1	-20.1
90/10/0/3	-21.0	80/20/0/3	-25.1
90/10/5/3	-20.1	80/20/5/3	-23.1



(ก)

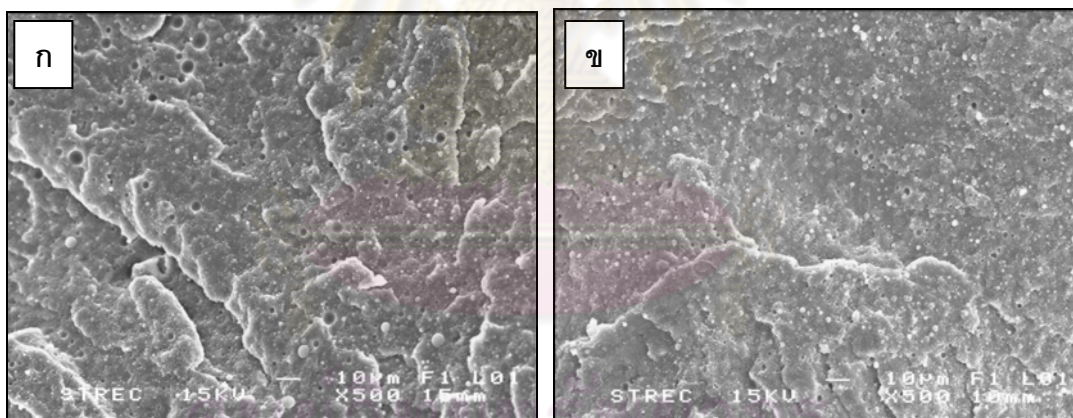


(ข)

รูปที่ 4.17 กราฟ  $\tan \delta$  ของนาโนคอมพอสิตระหว่าง TPU/PP/PP-g-MA/OMMT โดยมี (ก) ปริมาณ PP ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (ข) ปริมาณ PP ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

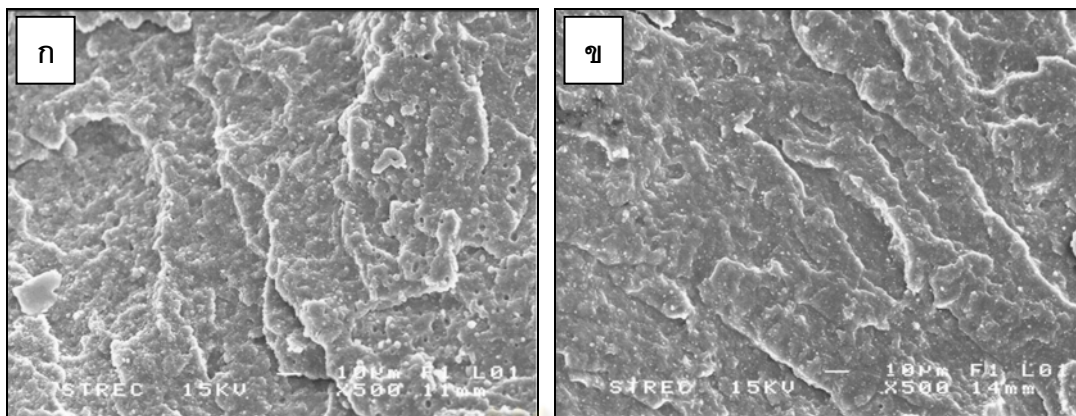
#### 4.4.4 สัณฐานวิทยา

นาโนคอมพอสิตที่มีพีพีเป็นส่วนประกอบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณมอนตม์อริลโลไนต์ 1 และ 3 phr โดยใช่และไม่ใช้สารช่วยผสม เมื่อนำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.18 - 4.21 พบว่า นาโนคอมพอสิตที่มีการใช้สารช่วยผสมจะมีขนาดอนุภาคพีพีที่เล็กลงและมีความเข้ากันมากขึ้น ซึ่งนอกจากจะเป็นผลจากการใช้สารช่วยผสมแล้ว อนุภาคเคลย์ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรยังช่วยลดพลังงานอิสระที่ผิวของส่วนแข็งของทีพียูทำให้สามารถเข้ากันได้ดีขึ้นกับ พีพีซึ่งไม่มีขั้ว นอกจากนี้การกระจายตัวที่ดีขึ้นของเคลย์ยังอาจเกิดจากหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรต์ในสารช่วยผสม เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของชั้นซิลิเกตของเคลย์ หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรต์กับพันธะยูรีเทนในส่วนแข็งของทีพียู [44]



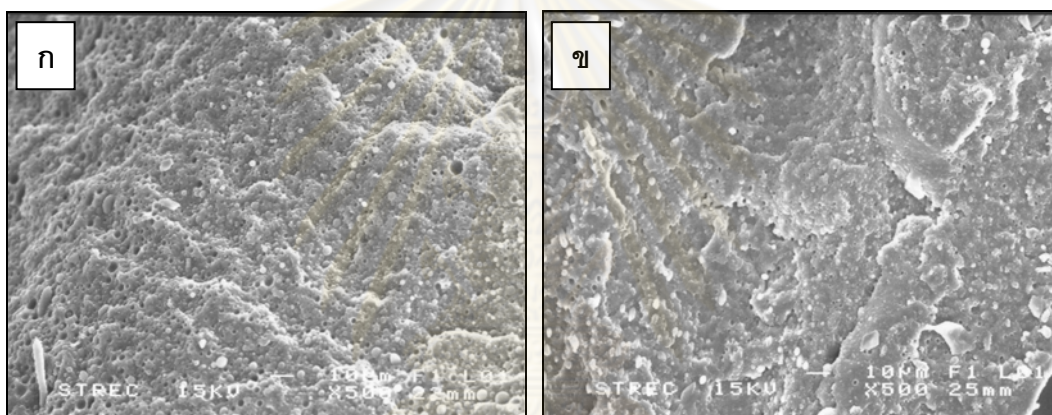
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10 ที่มีปริมาณเคลย์ 1 phr

(ก) ไม่ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA (ข) ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 5 phr



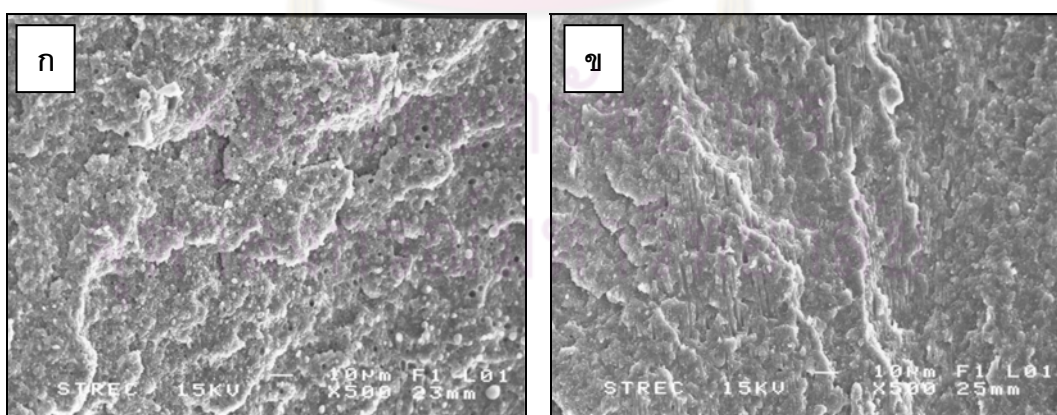
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิตที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10 ที่มีปริมาณเคลย์ 3 phr

(ก) ไม่ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA (ข) ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 5 phr



รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิตที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20 ที่มีปริมาณเคลย์ 1 phr

(ก) ไม่ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA (ข) ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 5 phr

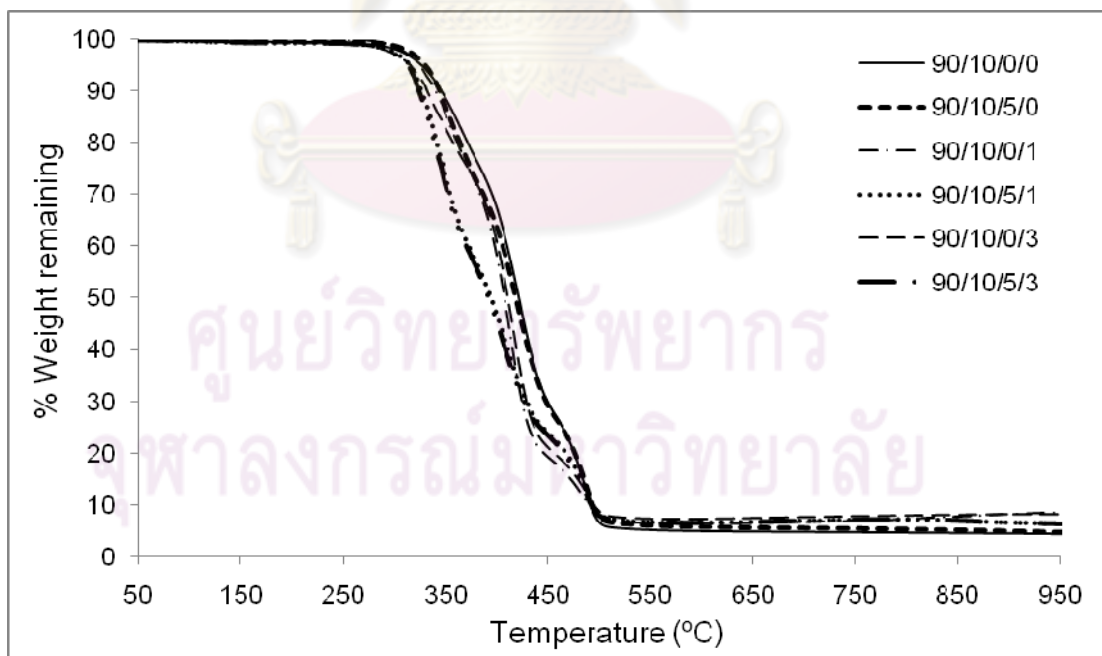


รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอลิตที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20 ที่มีปริมาณเคลย์ 3 phr

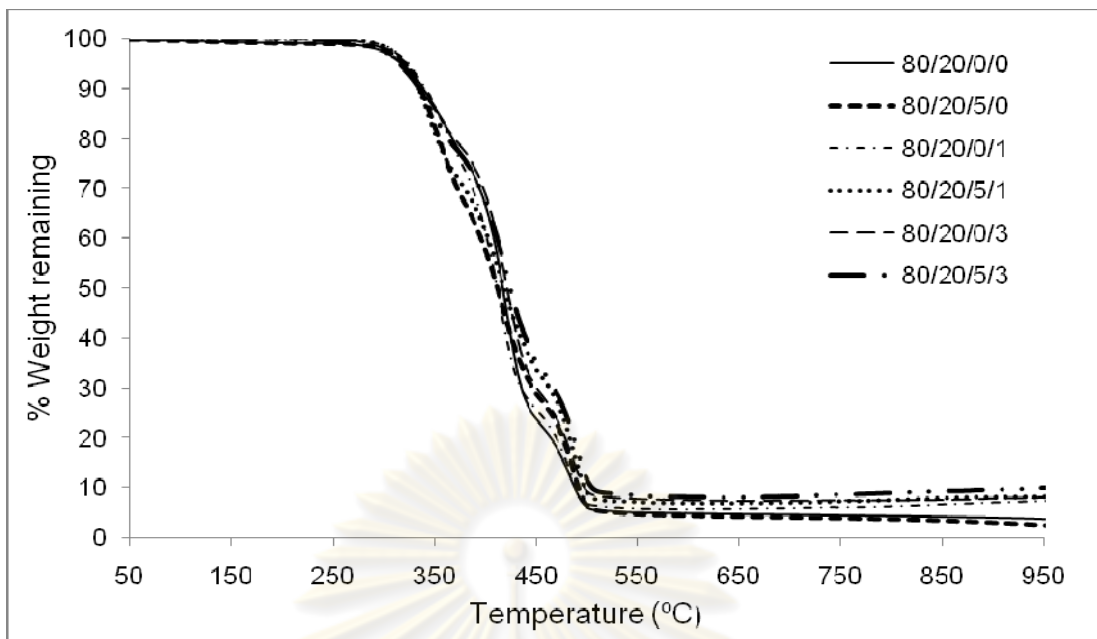
(ก) ไม่ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA (ข) ใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 5 phr

#### 4.4.5 อุณหภูมิการสลายตัว

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุนาโนคอมพอสิตเมื่อเทียบกับอุณหภูมิด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิสตั้งแต่อุณหภูมิ 50-1000°C ดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.23 พบว่านาโนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ แสดงว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัวของวัสดุนาโนคอมพอสิตและไม่ทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลง [1] ซึ่งอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากอัตราส่วนนี้อยู่ในช่วง 305-327°C ส่วนอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากอัตราส่วนนี้อยู่ในช่วง 303-325 °C นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละของน้ำหนักที่เหลืออยู่ของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากมีส่วนที่เหลือจากการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนซึ่งก็คือมอนต์มอริลโลไนต์ [45]



รูปที่ 4.22 TGA thermograms ของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน TPU/PP=90/10



รูปที่ 4.23 TGA thermograms ของนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน TPU/PP=80/20

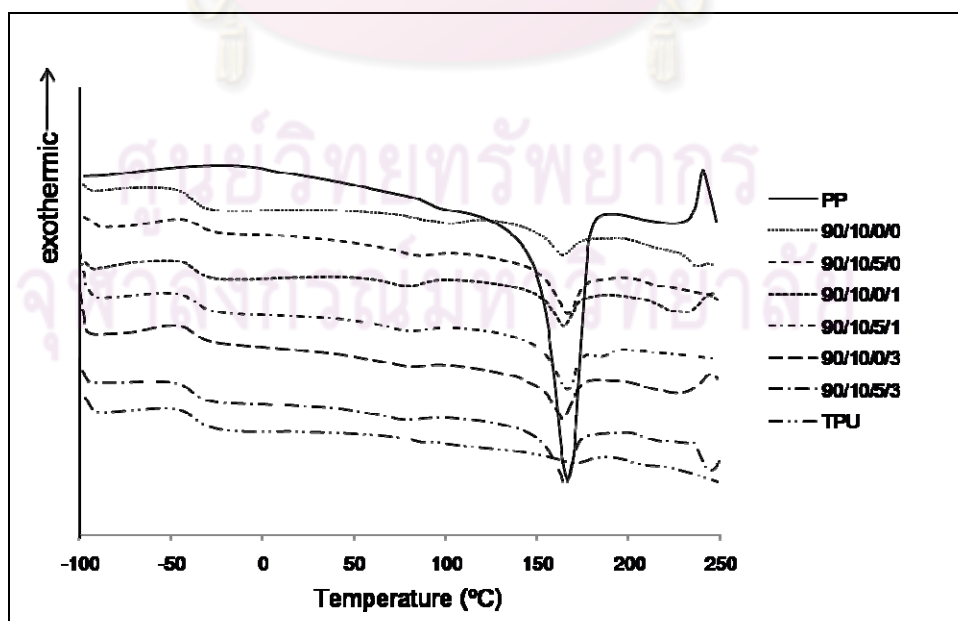
#### 4.4.6 คุณสมบัติการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

จากการวิเคราะห์นาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณฟิฟิร้อยละ 10 และ 20 และใช้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 และ 3 phr โดยเติมและไม่เติมสารช่วยผสมด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, DSC) ที่อุณหภูมิ -100 ถึง 250°C เพื่อศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) พบว่าการใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมจะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพีฟิไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพีฟิบริสุทธิ แต่ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงทรานซิชันของพีฟิมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพีฟิบริสุทธิ กล่าวคืออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่ใช้สารช่วยผสมมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าพอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น [44] แต่ไม่พบว่าการใช้สารช่วยผสมทำให้อุณหภูมิลอมเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากที่ทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิลอมเหลวอยู่ในช่วง 163-170°C และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่ 1 และ 3 phr พบว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ไม่ทำให้

อุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิหลอมเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ [1] โดยอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตแสดงในตารางที่ 4.4-4.5

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ , °C)		อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ , °C)
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	
PP	-	-	165.4
TPU	-36.0	78.4	169.7
90/10/0/0	-38.1	77.1	163.0
90/10/5/0	-33.8	65.1	165.9
90/10/0/1	-36.8	57.4	163.7
90/10/5/1	-35.5	59.0	165.9
90/10/0/3	-37.2	64.4	163.6
90/10/5/3	-37.7	56.5	164.6

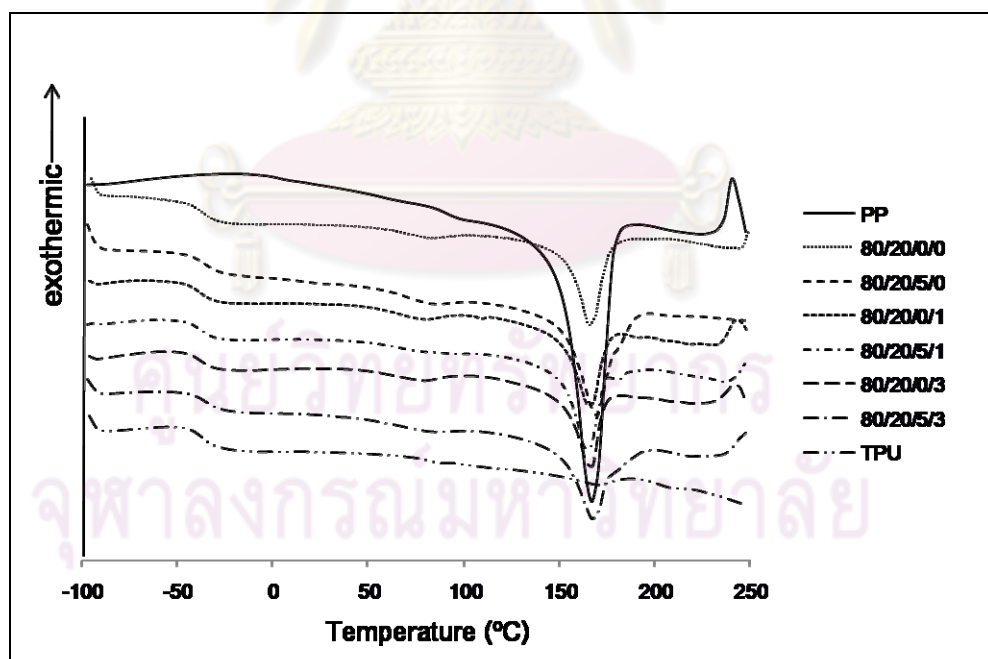


รูปที่ 4.24 DSC thermograms ของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 10



ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของนาโนคอมพอสิตที่มี ปริมาณพีพีร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ , °C)		อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ , °C)
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	
PP	-	-	165.4
TPU	-36.0	78.4	169.7
80/20/0/0	-38.1	63.2	165.9
80/20/5/0	-35.7	67.2	168.8
80/20/0/1	-38.4	59.8	165.2
80/20/5/1	-37.5	63.7	163.9
80/20/0/3	-37.6	57.4	165.2
80/20/5/3	-34.4	58.2	167.5



รูปที่ 4.25 DSC thermograms ของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 20

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (ทีพียู) และพอลิโพรพิลีน (พีพี) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทีพียูและพีพีเป็น 90/10 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 โดยไม่ใช้สารช่วยผสมและที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0 3 5 และ 10 phr จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และตรวจสอบสัณฐานวิทยา แล้วจึงเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมมาเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณพีพี จะทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง และต่ำสุดที่อัตราส่วนระหว่างทีพียู/พีพีเป็น 70/30 โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณพีพีเพิ่มขึ้น เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ความทนแรงดึงจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อเนื่องจากทีพียูเป็นพีพี นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณพีพีจะทำให้การยืดตัวออก ณ จุดขาดมีค่าลดลงแต่ยังมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้สารช่วยผสม พบว่าสมบัติความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารช่วยผสม แต่การใส่สารช่วยผสมในปริมาณที่สูงเกินไปอาจทำให้ความทนแรงดึงลดลง จากการทดลองพบว่า ปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 phr ซึ่งความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมนี้สามารถยืนยันได้ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพีพีร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม จึงนำมาเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตโดยเสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 1 และ 3 phr โดยใช้และไม่ใช้สารช่วยผสม

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรที่อยู่ในนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน พบว่าเคลย์มีระยะห่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบแทรกสอด และเมื่อทดสอบความทนแรงดึง

พบว่า การเสริมแรงด้วยเคลือบปริมาณ 1 phr และใส่สารช่วยผสมจะทำให้นาโนคอมพอสิตมีความทนแรงดึงสูงที่สุด เพราะนอกจากสารช่วยผสมจะทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้ดีขึ้นแล้วอนุภาคเคลือบที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรยังช่วยลดพลังงานอิสระที่ผิวของส่วนแข็งของทีฟียูทำให้สามารถเข้ากันได้ดีขึ้นกับพีพีซึ่งไม่มีข้ออื่นด้วย สำหรับสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิสและเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรีนั้นพบว่า การใส่เคลือบไม่มีผลในการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต โดยอุณหภูมิเริ่มต้นที่นาโนคอมพอสิตสลายตัวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี พบว่านาโนคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิหลอมเหลวน้อยมากเช่นกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมนาโนคอมพอสิตจากพอลิเมอร์ผสมทีฟียู/พีพีอาจใช้สารเสริมแรงตัวอื่นที่ไม่ใช่มอนต์มอริลโลไนต์ก็ได้ เช่น ซิลิกา คาร์บอนแบล็ค เป็นต้น
2. ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนทีฟียูต่อพีพีเป็น 50:50 โดยใช้สารช่วยผสมปริมาณ 10 phr ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการอัดแบบ ดังนั้นอาจต้องเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปเป็นวิธีฉีดเข้าแม่แบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] พรหมภูมิ พันธุ์โรจน์ และศรีญา รัตนกิจโกศล. การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีน. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [2] Ma, E.C.. Thermoplastic Polyurethane Elastomers. Walker B.M.; and Rader C.P., Handbook of Thermoplastic Elastomers, 224-255. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [3] Merquinsa. What's a polyurethane [online]. Available from: <http://www.merquinsa.com/whats/whatsaPU.pdf> , [2008, January 22].
- [4] Wanthane polymer. TPU basic knowledge [online]. Available from: <http://www.wanthane.com/images/6.pdf> , [2008, January 22].
- [5] สุชาดา จงประกอบกิจ. การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการแบบสารละลายเพื่อใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิเอไมด์ 6. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [6] ชวลิต จิตต์พูลกุล และปิยะลาภ ฤดีเลิศ. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงแคลบและซีเถ้าแคลบ. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [7] Jim C. The Polymerisation of Alkenes [online]. Available from: <http://www.chemguide.co.uk/organicprops/alkenes/polymerisation.html> , [2009, February 25].
- [8] สุภโชค ต้นพิชัย. พอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีนและขูด পেตใช้แล้วที่บดด้วยเทคนิคพัลเวอไรเซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [9] อุดมศักดิ์ พาลี. ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

- [10] ทวรรณ พิศรูป. การดัดแปรมอนต์มอริลลิตไนด์สำหรับสารเคลือบผิวอะคริลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [11] วลัยกร นิตยพัฒน์. การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตออร์กาโนเคลย์/พอลิพรอพิลีนที่ย้อมสีได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [12] Materials and Engineering Research Institute, Sheffield Hallam University. Composites [online]. Available from: <http://www.shu.ac.uk/research/meri/pcas/composites/index.html> , [2009, February 27].
- [13] U.S.Geological Survey. SMECTITE GROUP [online]. Available from: <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/smc.htm> , [2009, February 22].
- [14] Polymer Science Learning Center, Department of Polymer Science, University of Southern Mississippi. Modification of Montmorillonite Clay [online]. Available from: <http://www.pslc.ws/macrog/mpm/composit/nano/modify1.htm> , [2009, March 3].
- [15] หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. กระบวนการผลิต [online]. Available from: [http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbtech/process\\_2.htm](http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbtech/process_2.htm) , [2009, February 25].
- [16] Mukhtar A. Coloring of Plastics: Theory and Practices. Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- [17] Charlie M. In the Mix: Continuous Compounding Using Twin Screw Extruders [online]. Available from: <http://www.devicelink.com/mddi/archive/00/04/010.html> , [2009, February 25].
- [18] วิลเลียม เอฟ สมิธ. Principles of Materials Science and Engineering. แปลโดยแก่น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัศวทิวา. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ที่อป, 2547.
- [19] Dmitri K. Compression molding of polymers [online]. Available from: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression\\_molding\\_of\\_polymers](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression_molding_of_polymers) , [2009, February 27].

- [20] Michael H. Bragg diffraction [online]. Available from:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bragg\\_diffraction.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bragg_diffraction.png) , [2009, February 3].
- [21] KS Analytical Systems. X-ray Diffraction (XRD) [online]. Available from:  
<http://www.ksanalytical.com/theory> , [2009, February 25].
- [22] American National Standard. ASTM D638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2003.
- [23] Santa C. Stress-strain behavior [online]. Available from:  
[http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg\\_doc/develop/material/property/a2200002.htm](http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/material/property/a2200002.htm) , [2009, February 25].
- [24] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รัชณา ศิริสุข. Dynamic mechanical (thermal) analysis (DMA or DMTA). เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา Polymer Characterization, 90-117. 2548.
- [25] รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อากองศ์. DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS (DMA), เอกสารประกอบการสอนวิชาการตรวจสอบและการวิเคราะห์พอลิเมอร์, 2550.
- [26] Polymer Science Learning Center, Department of Polymer Science, University of Southern Mississippi. Differential Scanning Calorimetry [online]. Available from:  
<http://pslc.ws/macrogcss/dsc/html> , [2009, February 25].
- [27] CI Electronics. A typical Thermogravimetric kit [online]. Available from:  
[http://www.cielec.com/lab/microbalance/weight\\_force\\_recording\\_microbalance.html](http://www.cielec.com/lab/microbalance/weight_force_recording_microbalance.html) , [2009, February 25].
- [28] โครงการเทคโนโลยีสารสนเทศสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี. กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดา [online]. Available from: [http://www.princess-it.org/kp9/hrh-projects/file/20060327\\_sammakkee/Aee/Lunla/index.htm](http://www.princess-it.org/kp9/hrh-projects/file/20060327_sammakkee/Aee/Lunla/index.htm) , [2009, February 25].
- [29] Jim S. scanning electron microscope [online]. Available from:  
<http://www.purdue.edu/REM/rs/sem.htm> , [2009, February 25].
- [30] Potschke P., Wallheinke K., Fritsche H. and Stutz H. Morphology and Properties of Blends with Different Thermoplastic Polyurethanes and Polyolefines. Journal of Applied Polymer Science 64 (1998) : 749-762.

- [31] Di Y., Kang M., Zhao Y., Yan S. and Wang X. Morphology and Mechanical Properties of Blends of Thermoplastic Polyurethane and Polyolefins. Journal of Applied Polymer Science 99 (2006) : 875-883.
- [32] Cheol H.D., Min H.L., Young D.K., Byong H.M. and Jeong H.K. Effect of clays modifiers on the morphology and physical properties of thermoplastic polyurethane/clay nanocomposites. Polymer 47 (2006) : 6718-6730.
- [33] Chavarria F. and Paul D.R. Morphology and properties of thermoplastic polyurethane nanocomposites: Effect of organoclay structure. Polymer 47 (2006) : 7760-7773.
- [34] Lucilene B.P., Ana R.M. and Thiago R.G. Structural and optical properties of polypropylene-montmorillonite nanocomposites. Materials Science and Engineering A 447 (2007) : 261-265.
- [35] Lopez Q.M.L., Sanchez V.S., Ramos V.L.F. and Guedea M.R. Preparation and mechanical properties of PP/PP-g-MA/Org-MMT nanocomposites with different MA content. Polymer Bulletin 57 (2006) : 385-393.
- [36] Calcagno C.I.W., Mariani C.M., Teixeira S.R. and Mauler R.S. The role of the MMT on the morphology and mechanical properties of the PP/PET blends. Composites Science and Technology 68 (2008) : 2193-2200.
- [37] Wallheinke K., Potschke P. and Stutz H. Influence of Compatibilizer Addition on Particle Size and Coalescence in TPU/PP Blends. Journal of Applied Polymer Science 65 (1997) : 2217-2226.
- [38] Shadi H.A., Nadereh G.E. and Mohammad T.K. Study on Thermoplastic Polyurethane/ Polypropylene (TPU/PP) Blend as a Blood Bag Material. Journal of Applied Polymer Science 89 (2003) : 2496-2501.
- [39] Emi G.B., Ivan S. and Mirela L. Blends of Thermoplastic Polyurethane and Polypropylene. I. Mechanical and Phase Behavior. Journal of Applied Polymer Science 10 (2007) : 3980-3985.
- [40] Wallheinke K., Heckmann W., Potschke P. and Stutz H. Localizing Compatibilizers in Immiscible Blends by SEM. Polymer Testing 17 (1998) : 247-255.
- [41] Shadi H.A., Nadereh G.E. and Mohammad T.K. Studies on TPU/PP Blend and Comparing it with PVC Used as Blood Bag. Iranian Polymer Journal 12 (2003) : 179-184.

- [42] Emi G.B. and Vesna R. Dynamic mechanical study of thermoplastic polyurethane/polypropylene blends. e-Polymers 73 (2004) : 1-10.
- [43] Dean S., Wei Y., Robert K.Y.L., Zhuo K. and Jinghua Y. An investigation on the dispersion of montmorillonite (MMT) primary particles in PP matrix. European Polymer Journal 43 (2007) : 3250-3257.
- [44] Kannan M., Bhagawan S.S., Joseph K. and Thomas S. Thermomechanical behavior of nanoclay filled TPU/PP blends. e-Polymers 133 (2008) : 1-15.
- [45] อัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ และอาจารย์ อัครดิลลภุทธิ. การเตรียมนาโนคอมพอสิตของ MDPE/มอนต์มอริลโลไนต์. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยไม่ใช้สารช่วยผสม

TPU/PP	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10	19.92	1549.30	10.66
	18.72	1514.47	9.98
	18.95	1510.35	8.20
ค่าเฉลี่ย	19.20	1524.71	9.61
SD	0.64	21.40	1.27

TPU/PP	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20	11.78	997.41	19.66
	9.70	853.71	19.60
	10.39	1130.69	25.09
ค่าเฉลี่ย	10.62	993.94	21.45
SD	1.06	138.52	3.15

TPU/PP	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
70/30	5.38	177.53	35.22
	5.77	274.44	34.41
	5.63	154.61	36.26
ค่าเฉลี่ย	5.59	202.19	35.30
SD	0.20	63.60	0.93

TPU/PP	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
60/40	8.25	126.27	107.83
	8.53	111.54	114.18
	8.35	156.29	103.20
ค่าเฉลี่ย	8.38	131.37	108.40
SD	0.14	22.81	5.51

TPU/PP	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำย้งมอดุลัส (MPa)
50/50	13.01	127.81	164.62
	13.47	131.27	120.54
	13.12	106.79	149.45
ค่าเฉลี่ย	13.19	121.96	144.87
SD	0.24	13.25	22.39



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้สารช่วยผสมปริมาณ 3 phr

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/3	21.34	1725.20	12.68
	20.75	1729.29	11.09
	21.32	1720.94	11.97
ค่าเฉลี่ย	21.30	1725.14	11.91
SD	0.55	4.17	0.79

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/3	12.06	1144.74	26.09
	12.48	1121.83	23.52
	12.86	1069.14	22.02
ค่าเฉลี่ย	12.47	1111.90	23.88
SD	0.40	38.76	2.06

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
70/30/3	7.20	197.55	65.68
	7.43	193.39	65.98
	6.74	190.28	62.41
ค่าเฉลี่ย	7.12	193.74	64.69
SD	0.35	3.64	1.98

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
60/40/3	10.45	30.21	95.57
	10.89	46.84	167.63
	10.78	76.26	119.04
ค่าเฉลี่ย	10.71	51.10	127.41
SD	0.23	23.32	36.75

TPU/PP/PP- <i>g</i> -MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยั้งมอดุลัส (MPa)
50/50/3	13.62	88.01	169.62
	13.44	115.32	106.14
	13.93	117.10	117.42
ค่าเฉลี่ย	13.66	106.81	131.06
SD	0.25	16.30	33.87



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้สารช่วยผสมปริมาณ 5 phr

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/5	22.34	1764.60	11.01
	25.32	1840.69	12.72
	24.49	1845.20	13.38
ค่าเฉลี่ย	24.05	1816.83	12.37
SD	1.53	45.29	1.22

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/5	15.21	1213.88	26.89
	12.35	1325.09	23.99
	14.28	1598.37	26.98
ค่าเฉลี่ย	13.95	1379.11	25.96
SD	1.46	197.86	1.70

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
70/30/5	9.22	600.39	75.71
	9.76	559.47	79.99
	9.83	629.82	78.76
ค่าเฉลี่ย	9.61	596.56	78.15
SD	0.33	35.33	2.20

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
60/40/5	11.72	144.79	117.70
	11.73	125.24	111.62
	11.46	141.98	130.26
ค่าเฉลี่ย	11.64	137.33	119.86
SD	0.15	10.57	9.51

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
50/50/5	12.53	126.46	145.60
	12.63	93.17	161.90
	12.50	75.79	120.97
ค่าเฉลี่ย	12.56	98.47	142.82
SD	0.07	25.75	20.60



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้สารช่วยผสมปริมาณ 10 phr

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/10	21.25	1403.72	20.37
	20.80	1387.90	19.22
	21.10	1269.58	20.91
ค่าเฉลี่ย	21.05	1353.58	20.17
SD	0.23	73.57	0.86

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/10	8.77	540.88	59.56
	11.17	660.89	46.71
	7.26	770.34	45.48
ค่าเฉลี่ย	9.07	657.37	50.58
SD	1.97	114.77	7.80

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
70/30/10	10.61	267.66	104.31
	10.57	352.26	125.31
	10.42	158.70	80.97
ค่าเฉลี่ย	10.53	259.54	103.53
SD	0.10	97.03	22.18

TPU/PP/PP-g-MA	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
60/40/10	14.06	48.48	118.49
	14.06	57.70	118.16
	14.18	53.51	109.51
ค่าเฉลี่ย	14.10	53.23	115.38
SD	0.07	4.61	5.09



ภาคผนวก ข

สมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิต

สมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 10

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/0/1	21.87	1757.00	10.11
	21.33	1650.28	9.49
	22.24	1770.09	9.44
ค่าเฉลี่ย	21.81	1725.79	9.68
SD	0.46	65.72	0.37

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/0/3	21.09	1595.09	10.23
	19.65	1561.16	10.79
	19.89	1402.76	11.28
ค่าเฉลี่ย	20.21	1519.67	10.77
SD	0.77	102.66	0.53

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/5/1	23.09	2316.29	10.82
	25.26	2374.77	10.95
	24.27	2383.21	10.66
ค่าเฉลี่ย	24.21	2358.09	10.81
SD	1.09	36.48	0.14

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
90/10/5/3	19.03	1650.56	12.28
	19.15	1459.34	11.79
	19.61	1777.22	13.93
ค่าเฉลี่ย	19.26	1629.04	12.67
SD	0.31	160.03	1.12

## สมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ PP ร้อยละ 20

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/0/1	12.80	1153.66	23.02
	12.68	1123.29	22.56
	13.10	1172.11	24.19
ค่าเฉลี่ย	12.86	1149.69	23.28
SD	0.22	24.65	0.84

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/0/3	8.48	829.49	26.90
	6.40	457.51	27.93
	9.23	922.81	26.67
ค่าเฉลี่ย	8.04	736.61	27.17
SD	1.46	246.16	0.67

TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/5/1	15.91	1492.19	25.09
	15.92	1375.77	28.52
	14.24	1088.08	24.70
ค่าเฉลี่ย	15.36	1318.68	26.10
SD	0.97	208.02	2.10

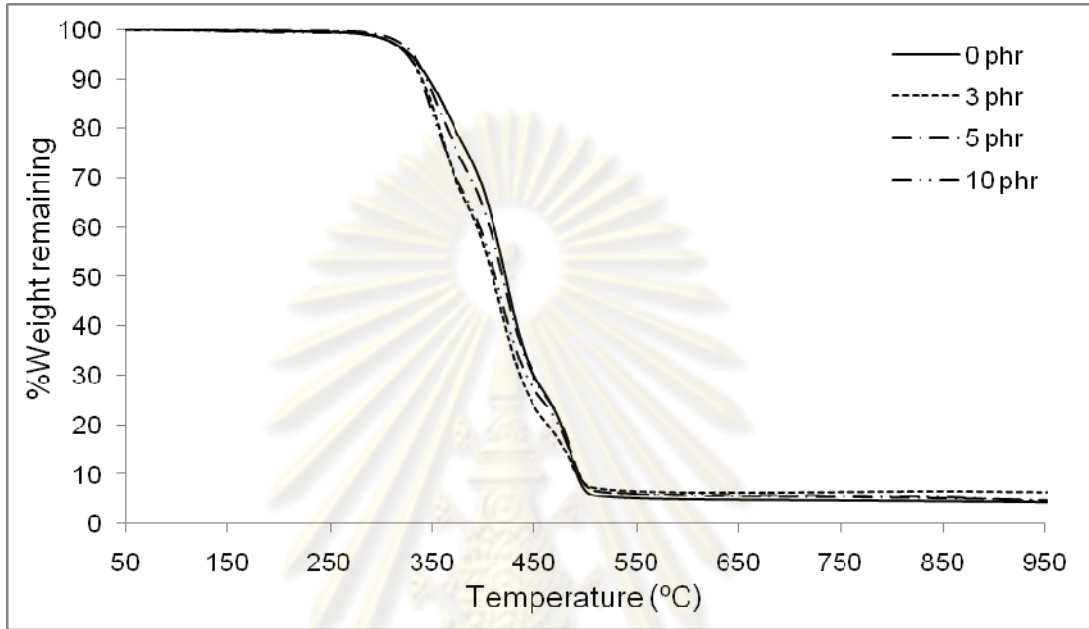
TPU/PP/PP-g-MA/OMMT	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	ค้ำยังมอดุลัส (MPa)
80/20/5/3	13.78	1229.47	23.03
	14.44	1451.99	23.04
	13.61	1463.17	23.65
ค่าเฉลี่ย	13.94	1381.55	23.24
SD	0.44	131.82	0.36

ภาคผนวก ค

TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

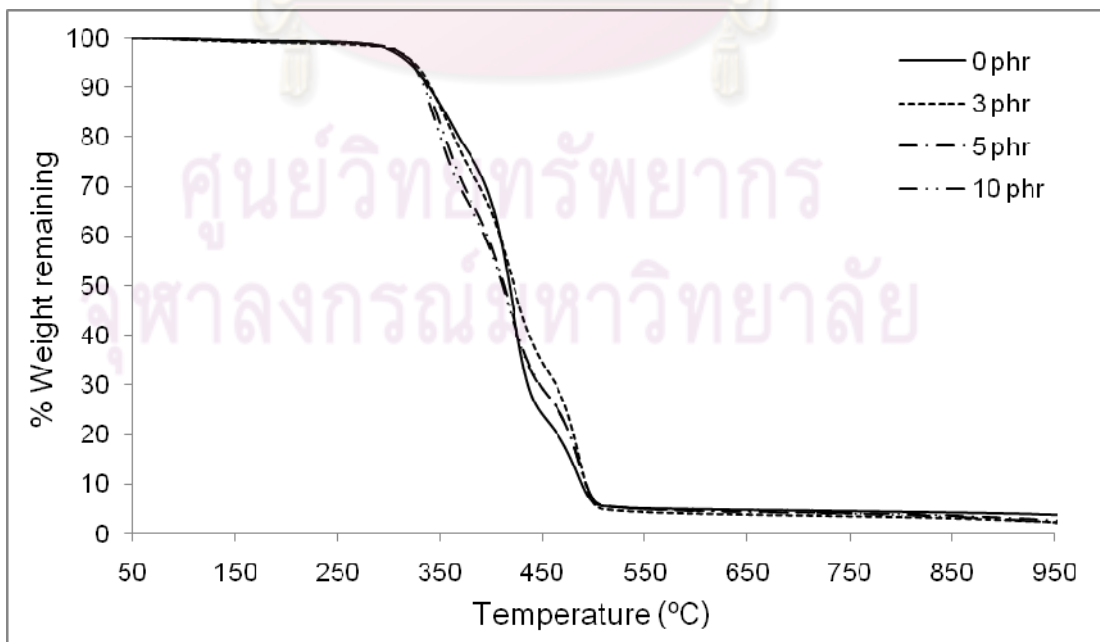
TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน TPU/PP เป็น 90/10 โดยน้ำหนัก

และใช้สารช่วยผสมปริมาณ 0 3 5 และ 10 phr

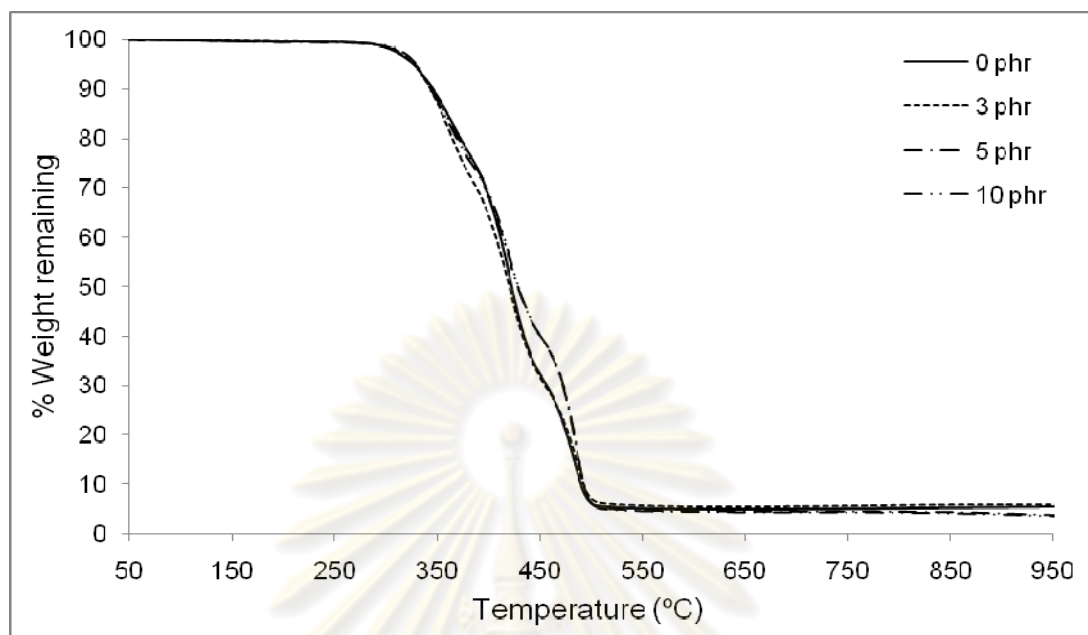


TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน TPU/PP เป็น 80/20 โดยน้ำหนัก

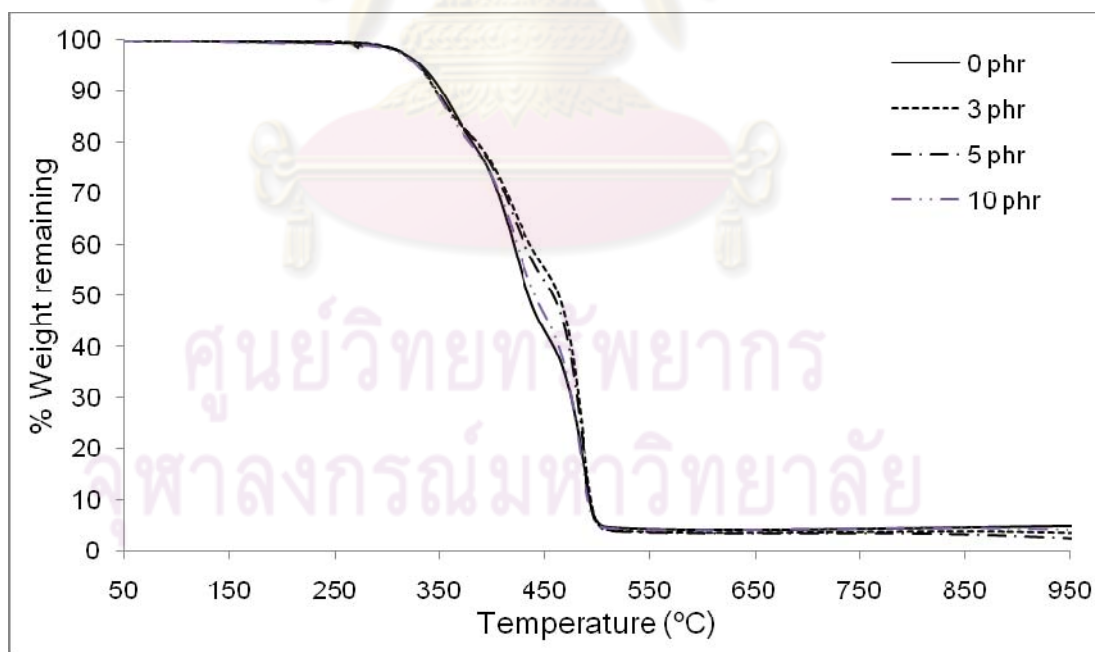
และใช้สารช่วยผสมปริมาณ 0 3 5 และ 10 phr



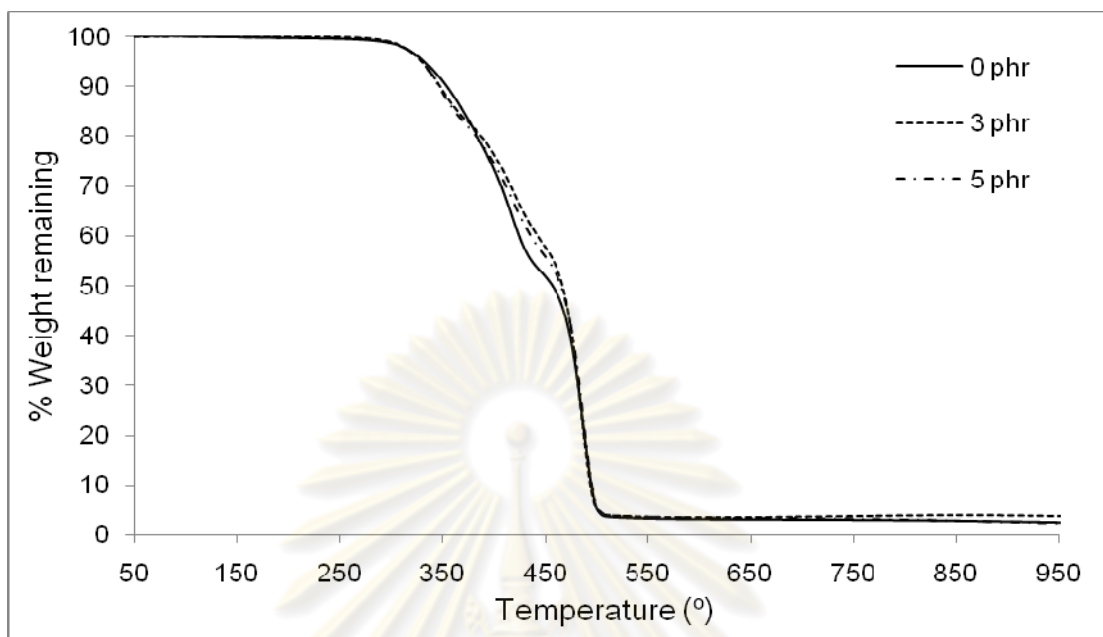
TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน TPU/PP เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก  
และใช้สารช่วยผสมปริมาณ 0 3 5 และ 10 phr



TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน TPU/PP เป็น 60/40 โดยน้ำหนัก  
และใช้สารช่วยผสมปริมาณ 0 3 5 และ 10 phr



TGA thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน TPU/PP เป็น 50/50 โดยน้ำหนัก  
และใช้สารช่วยผสมปริมาณ 0 3 และ 5 phr



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของนาโนคอมพอสิต

TPU/PP/PP- <i>g</i> -MA/OMMT	อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัว ( $T_d$ , °C)		
	I	II	III
PP	416.3	-	-
TPU	320.1	399.6	-
90/10/0/0	323.3	401.1	473.2
90/10/5/0	326.1	402.9	473.5
90/10/0/1	320.3	392.8	469.9
90/10/5/1	310.9	391.5	474.1
90/10/0/3	306.6	392.6	475.2
90/10/5/3	304.0	394.8	475.4
80/20/0/0	318.0	402.7	465.9
80/20/5/0	324.4	402.0	473.5
80/20/0/1	308.1	395.9	469.9
80/20/5/1	318.9	395.9	474.5
80/20/0/3	303.6	402.4	473.6
80/20/5/3	309.9	398.4	474.7

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสินีนานา ไทยบุญรอด เกิดเมื่อวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้น เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นในปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายของปีการศึกษา 2551 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย